

斜張橋並列ケーブル耐風制振に 関する共同研究報告書(その3)

平成7年3月

建設省土木研究所構造橋梁部	財団法人土木研究センター
石川島播磨重工業株式会社	株式会社エスイー
株式会社大林組	鹿島建設株式会社
川崎重工業株式会社	清水建設株式会社
住友建設株式会社	住友重機械工業株式会社
株式会社長大	飛島建設株式会社
日本鋼管株式会社	株式会社ピー・エス
日立造船株式会社	三井造船株式会社
三菱重工業株式会社	

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耐風制振に 関する共同研究報告書(その3)

平成7年3月

建設省土木研究所構造橋梁部

構造研究室長 佐藤 弘 史

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 樋上 秀 一
株式会社 大林 組

技術研究所構造第一研究室

主任研究員 大内 一

川崎重工業株式会社

橋梁技術総括部 技術部部長 小川 一 志

住友建設株式会社

技術研究所 主任研究員 中井 裕 司

株式会社 長 大

長大橋事業部事業部長 柴田 定 昭

日本鋼管株式会社

基盤技術研究所 都市工学研究部

主幹 藤澤 伸 光

日立造船株式会社

鉄構・建機事業本部

橋梁設計部部長代理 田中 洋

三菱重工業株式会社

長崎研究所流体・伝熱研究室主務 斎藤 通

財団法人 土木研究センター

理 事 小林 茂 敏

株式会社 エスイー

工務部部長代理 及川 孝 一

鹿島建設株式会社

技術研究所第一研究部次長 竹田 哲 夫

清水建設株式会社

土木本部 技術第一部PCグループ 大野 浩

住友重機械工業株式会社

橋梁鉄構事業部技術室課長 宮崎 正 男

飛鳥建設株式会社

技術本部 土木技術開発部主任 岡本 浩

株式会社 ビー・エス

土木技術部主任研究員 久保 明 英

三井造船株式会社

鉄構建設事業部 技術部課長 井上 浩 男

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の平成5年度の成果を報告するものである。本年度はウェークギャロッピングの特性を明らかにするための研究および新しい制振装置の開発とその効果に関する基礎的な実験が実施された。前者に関しては、新しく実施された多くの風洞実験結果を示し、ウェークギャロッピングの発現状況を考察した。本研究によってウェークギャロッピングの性状とケーブル間隔の関係、構造減衰および気流の乱れ等との関係が明らかになった。後者に関しては、主に減衰付加型スパーサおよび空力的対策に関し、実験および解析による効果の検討の成果をとりまとめた。

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

目 次

1. まえがき	1
2. 研究体制	2
2.1 共同研究参加企業と研究担当者	2
2.2 研究分担	5
3. 3年間の研究成果のまとめ	6
3.1 研究成果の概要	6
3.2 ウェークギャロッピングの特性予測に関する研究	7
3.3 制振手法の合理化に関する研究	9
3.4 新しい構造力学的制振装置の開発に関する研究（その1）	11
3.5 新しい構造力学的制振装置の開発に関する研究（その2）	14
3.6 空力的制振手法の開発に関する研究	16
3.7 数値解析による制振効果の評価に関する研究	18
4. 本年度の研究成果	19
4.1 本年度研究成果の概要	19
4.2 ウェークギャロッピングの特性予測に関する研究	21
4.2.1 ケーブル間隔と迎角の影響（その1）	22
4.2.2 ケーブル間隔と迎角の影響（その2）	37
4.2.3 振動の自由度および気流特性の影響	52
4.2.4 偏角の影響	61
4.3 新しい構造力学的制振装置の開発に関する研究（その1）	76
4.3.1 概要	76
4.3.2 実大振動実験に用いた並列ケーブルの特性	78
4.3.3 高減衰ゴムを用いたスペーサー（その1）	84
4.3.4 高減衰ゴムを用いたスペーサー（その2）	91
4.3.5 高減衰ゴムを用いたスペーサー（その3）	101
4.3.6 摩擦型減衰機能付きスペーサー	109
4.3.7 風洞実験	115
4.3.8 スペーサーの配置方法に関する解析的検討	148
4.4 新しい構造力学的制振装置の開発に関する研究（その2）	161
4.5 空力的制振手法の開発に関する研究	169

4.6 数値解析による制振効果の評価に関する研究	189
付録-1 第4、5回中間報告会 質疑応答結果	203
付録-2 発表論文一覧表.....	210
付録-3 出願特許一覧.....	212

第1章 まえがき

近年、斜張橋は構造計算技術の発達に伴い、その優れた構造性を評価できるようになってきたことに加え、景観上の理由から建設件数の増加及び長径間化がみられる。また、斜張橋の桁には従来鋼桁が主として用いられてきたが、PC桁を用いた斜張橋の建設事例も増加している。これに伴い、荷重の増加、施工性への配慮から2本以上のケーブルを並列配置した斜張橋の建設も増加傾向にある。

これらの並列ケーブルにおいては、ウェークギャロッピングと呼ばれる低風速から広い範囲で発生するケーブルの振動現象が問題になっているが、その特性及び発生原因は明らかになっておらず、制振対策の設計法についても明確にされていなかった。そのため、平成4年度から平成6年度ま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特性の把握と、制振装置の開発および設計法の明確化を目的として、土木研究所、土木研究センター、および重工会社、総合建設会社、設計コンサルタント、計15社により共同研究が実施された。

本報告書は、過去3年間の研究成果の概要と平成6年度の研究成果を取りまとめたものである。平成6年度は、ウェークギャロッピングの特性を明らかにするための風洞実験および新しい制振装置の開発とその効果に関する実験および3年間のとりまとめが実施された。

第2章 研究体制

2. 1. 共同研究参加企業と研究担当者

表-2.1.1 に参加企業とそれぞれの研究担当者を示す。

表-2.1.1 参加企業と研究担当者

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
財団法人土木研究センター	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 琇 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2設計部 次長 土木設計本部 第2設計部 技術研究所 第1研究部 次長 技術研究所 第1研究部第2研究室	和 田 信 秀 佐 野 演 秀 竹 田 哲 夫 向 弘 晴

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 齊 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 敏 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 齊 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 康 哲 山 崎 武 嗣 上 野 武 志 山 崎 武 文 臺 原 直
飛島建設株式会社	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
株式会社ビー・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	中 垣 亮 二 植 田 利 夫

三井造船株式会社	鉄構・建機事業本部 橋梁設計部 部長代理	田 中 洋
	鉄構・建機事業本部 橋梁設計部	三 河 克 己
	技術研究所構造・流体技術研究センター 主任研究員	砂 田 博 幸
	技術研究所構造・流体技術研究センター	山 口 映 二
三菱重工業株式会社	鉄構建設事業部 技術部 課長	井 上 浩 男
	鉄構建設事業部 技術部	大 森 龍一郎
	鉄構建設事業部 技術部	林 健 一
	鉄構建設事業部 技術部	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	逸 見 雄 人
	広島製作所 鉄構技術部 橋梁設計課 主任	増 田 伊知郎
	長崎研究所 流体・伝熱研究室 主務	斎 藤 通
	長崎研究所 流体・伝熱研究室 主任	本 田 明 弘
	長崎研究所 流体・伝熱研究室	平 井 滋 登
	広島研究所 鉄構・土木研究室 主務	佐 々 木 伸 幸

2.2 研究分担

研究の実施に先立ち、研究内容を表-2.2.1のようにブレイクダウンして、それぞれ幹事担当者を定めた。

表-2.2.1 研究分担

グループ名	研究 分 担 の 内 容	幹 事	担 当 企 業
A	実橋におけるウェークギャロッピングの特性予測のデータの充実	①三井造船 ②IHI ③三菱重工	IHI NKK 川崎重工 日立造船 住友重機械 三井造船 長大 三菱重工 (8社)
B	連結およびスペーサによる制振手法の合理化の研究	鹿島	鹿島 エスイー (2社)
C-1	新しい構造力学的制振装置の開発(減衰向上機能付きスペーサの開発)	住友建設	大林組 飛鳥建設 清水建設 ビーエス 住友建設 (5社)
C-2	新しい構造力学的制振装置の開発(連結材等の減衰付加に関する研究)	①NKK ②長大 ③川崎重工	IHI 長大 川崎重工 (3社)
D	空力的制振手法の開発	①日立造船 ②住友重機 ③長大	住友重機械 日立造船 (2社)

①②③は年度を示す。

第3章 3年間の研究成果のまとめ

3.1 研究成果の概要

平成4年度から6年度にわたる3年間、ウェークギャロッピングの特性の把握と、制振装置の開発および制振対策の明確化のため、共同研究が実施された。詳細は次節以降において述べられるが、概要として以下のような成果を挙げることができる。

ウェークギャロッピングの特性の把握として、多くの風洞実験より、ウェークギャロッピングの発現風速、振幅および振動の特性と、構造減衰、ケーブル間隔、水平偏角、迎角などの影響因子との関係が示された。また、これらの結果からウェークギャロッピング発生メカニズムが考察された。

新しい制振装置として、数種類の減衰機能付きスパーサおよびケーブル被覆管の改良が提案された。前者は風洞実験、実物大ケーブルによる振動実験および数値解析により減衰付加効果が確認された。後者については、風洞実験により、効果が確認された。

さらに、風洞実験や数値解析から、ケーブル連結や桁位置ダンパーの制振効果についても評価がなされた。

以上の共同研究における成果および現在得られている知見をもとに「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）」がまとめられた。

ウェークギャロッピングは当初の予想以上に複雑な現象であり、従来から知られている空力現象とは異なる点が多数存在することが共同研究の進捗とともに明らかになった。現時点においてもウェークギャロッピングの特性およびそのメカニズムは不明な点が多く、またその制振手法についても全ての問題が解決された訳ではない。従って、作成されるマニュアル（案）は共同研究終了時点の知見において合理的な制振対策を行うためのものであり、暫定的な性格を有すものとなった。

3.2 ウェイクギャロッピングの特性予測に関する研究

3.2.1 研究の目的

本研究では、実橋におけるウェイクギャロッピングの応答特性を予測するためのデータを充実させることを目的に、参加各機関で風洞実験を分担し、様々な条件下でのウェイクギャロッピングの応答特性を調べた。また、応答予測手法（マニュアル）の構築や振動抑制手法（制振対策）を開発することを目的に本ウェイクギャロッピング振動を発生させる空気力を風洞試験より求め、振動発生メカニズムを調べた。

3.2.2 研究の方法

以下に参加各機関が各年度毎に実施した内容をまとめて表-3.2.1に示す。

表-3.2.1 実施内容一覧

参加機関名	平成4年度	平成5年度	平成6年度
石川島播磨重工業㈱	計 画	<風洞試験> 偏角の影響調査 ◎まとめ	<風洞試験> 振動発生メカニズム調査
川崎重工業㈱	当グループにおける実施項目は無し 当グループには討議のみ参加		
住友重機械工業㈱	計 画	<風洞試験> ケーブル間隔と迎角の 影響調査	<風洞試験> 振動の自由度、ケーブル間隔 ケーブル径の影響調査
㈱長大	当グループにおける実施項目は無し 当グループには討議のみ参加		
日本鋼管㈱	計 画	<風洞試験> 振動の自由度及び 気流特性の影響調査	<風洞試験> 振動発生メカニズム調査
日立造船㈱	当グループにおける実施項目は無し 当グループには討議のみ参加		
三井造船㈱	計 画 ◎まとめ	<風洞試験> ケーブル間隔と迎角の 影響調査	<風洞試験> 振動発生メカニズム調査
三菱重工業㈱	計 画	<風洞試験> 高レイノルズ数における 空力特性調査	無し ◎まとめ

◎印：幹事

3.2.3 研究成果の概要

以上の研究の結果、斜張橋並列ケーブルに発生するウェイクギャロッピング振動の様々な応答特性が明らかとなるとともに、ウェイクギャロッピング振動の発生メカニズムの概要が明らかになった。更に本成果をもとに、ウェイクギャロッピング振動応答予測マニュアル作成の基礎データを提供した。

具体的な成果を以下にまとめて示す。

(1) ウェイクギャロッピングの振動応答特性について

1) ウェイクギャロッピングの発現風速は無次元風速で整理することができない。

即ち、ケーブルの固有振動数を変えても発現風速はほとんど変わらない。

2) ウェイクギャロッピングの発現風速は質量・減衰パラメータを増加させると上昇する。具体的には、構造減衰を付加していないケーブルでは風速 2 m/s 程度から発現していたものが、構造減衰を 0.1 まで増加させると 8 m/s 程度まで上昇する。

3) ウェイクギャロッピングは超臨界レイノルズ数領域になると振動が発生しにくくなる。

4) ウェイクギャロッピングの振動振幅は超臨界レイノルズ数以下では、一般的に風速の増大にともない単調増加する傾向がある。

5) その発生振動振幅の最大値は、風向直角方向で 3.0D、風向方向で 1.5D 程度である。

6) 上記振動の発生メカニズムとしては、2 本のケーブルの間のギャップフローの存在が大きく関わっていると考えられる。

(2) ケーブル間隔の影響について

1) ウェイクギャロッピングは、1.5D～6 D のケーブル間隔の時発生しやすい。

2) ケーブル間隔が 3 D を境に応答特性（風速に対する振幅の増加の程度）が大きく変化する。

3) 上記の特性の変化は、非定常圧力試験結果からも確認された。

(3) 迎角及び偏角の影響

1) 大局的には、今回実施した試験の範囲では迎角及び偏角とも 0° の場合が最も振動が発生し易く迎角及び偏角が増大するにつれて安定化する。

2) ただし厳密には水平間隔によっては、0° の場合が最も安定化することもある。

(4) 乱れの影響

1) 乱れについては、全般的には振幅を低減する効果があるものと考えられる。

2) その効果は、ケーブル間隔が 6 D 以上で顕著で、4 D 以下ではほとんど認められない。

3.2.4 今後の課題

(1) ウェイクギャロッピングの発現風速の特性、振動振幅の上限値の存在など、そのメカニズムは定性的には説明できるが、定量的には今後の課題である。

(2) 又、乱れの影響については今回の風洞試験だけでは十分に把握できたと考えられず、今後の研究がまたれる所である。

3.3 制振手法の合理化に関する研究

3.3.1 研究の目的

本実験では、次に示すような項目について制振対策の効果を調査し、ウエイクギャロッピングの制振に有効な対策を調べた。

(1) スペーサーの効果

ワイヤーを付けずに、スペーサーだけを用いた場合について、スペーサーの間隔とウエイクギャロッピングの発現風速及び最大振幅の関係を求めた。

(2) ワイヤーの効果

スペーサーとワイヤーを用いて、ワイヤーの連結方法の違い、他ケーブルの剛性・重量の影響、ワイヤー端部にダンパーを取り付けた場合の影響等について、ウエイクギャロッピングの発現風速及び最大振幅の比較を行った。

(3) ダンパーの効果

スペーサーやワイヤーを取付けずに、ケーブル端部にダンパーを取付けた場合について、ケーブル系の減衰定数（ダンパーの減衰係数）とウエイクギャロッピングの発現風速及び最大振幅の関係を求めた。

(4) 新しい制振対策の効果

ケーブル間隔を拡大・縮小した場合の発現風速とケーブル間隔の関係を調べた。

3.3.2 研究の方法

本研究では、制振対策の効果について比較するために、タウトストリップ模型実験を実施した。模型諸元は、ケーブル径75mm程度の細径の実橋ケーブルを対象に設定し、実験条件は既往の実験例を参考にウエイクギャロッピング振動ができるだけ顕著に発生するように設定した。

3.3.3 研究成果の概要及び今後の課題

本実験において明らかになったそれぞれの制振対策の効果及び今後の課題についてまとめると以下のようになる。

(1) スペーサーの効果

本実験のようなケーブル間隔が $3D$ (D : ケーブル径) の場合、スペーサーを取り付けることによって発現風速の2倍程度の上昇はみられるものの、振幅はほとんど変わらず制振効果はほとんど期待できないと思われる。

(2) スペーサーと連結ワイヤーの効果

大振幅の振動は抑えることが出来るため、制振効果があると思われる。

しかし、サブスパン振動が全体1次モードとほぼ同じ風速で発現する。サブスパン振動は振幅は小さいがスパンが短いためケーブルの曲げ角度にすると、必ずしも低減されておらず疲労を検討しなければならない場合がある。改良案として、制振ワイヤーの取付間隔を小さくする、サブスパンの間にスペーサーを取り付けること等が考えられるが、制振ワイヤー・スペーサー等の間隔が空力的に設定できないため、現状では経験的に間隔を決めざるを得ない等の問題点がある。

(3) ダンパーの効果

本実験のようなケーブル間隔が3Dの場合、顕著な制振効果は期待できないと思われる。

これは実橋で実際に付加できる減衰 $\delta=0.12$ を付加しても、発現風速が無対策時の発現風速の高々3倍（風洞風速9 m/s）程度にしか上昇せず、振動が発生した場合の振幅はほとんど変わらないためである。

(4) ケーブル間隔調整の効果

ケーブル間隔を1.1D～1.5D、6.0D以上にすれば風洞風速内で振動が発生しないため、この範囲にケーブル間隔を縮小・拡大すれば、制振効果が期待できると思われる。ただし、既設ケーブルのケーブル間隔を拡大する場合、2本のケーブルが連成してねじれに対して不安定な構造となり、ねじり振動が発生する恐れがあるため、その対策が別途必要である。

3.4 新しい構造力学的制振装置の開発に関する研究（その1）

3.4.1. 研究の目的

斜張橋に並列配置されたケーブルに生じるウェイクギャロッピングに対して、主に減衰機能を備えた構造力学的制振装置（以降、スパーサと称す）を設置することによる制振手法の開発、および開発したスパーサを用いて耐風制振設計を行う手法を確立することを目的とする。

3.4.2. 研究の方法

新しい減衰機構を持つスパーサの開発を行うとともに、数値解析手法についても検討を行う。これらの装置の性能を確認するために、並列ケーブルにスパーサを取り付けた振動実験を実施する。この結果をもとに、スパーサの改良、改善あるいは新たな装置の開発を行う。

次に実大規模の斜張橋ケーブルにスパーサを取り付けた振動実験を行い、スパーサの性能を確認する。また、風況下におけるスパーサの有効性を調べるために、風洞実験を実施する。

最後に、これらの実験の結果を踏まえ、数値解析手法により、配置方法や評価方法などの検討を行う。

図-3.4.1 に、研究のフローを示す。

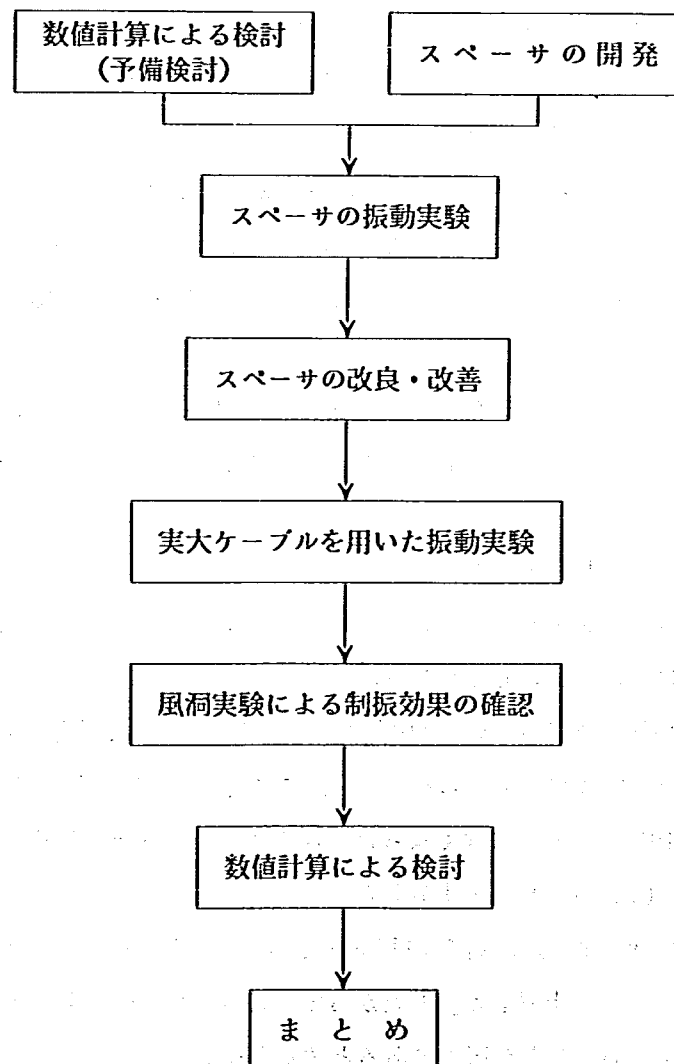


図-3.4.1 研究フロー

3.4.3. 研究成果の概要

以下に3年間の研究成果の概要を述べる。

(1) 平成4・5年度の研究成果

1) ケーブル張力を考慮した複素固有値解析を実施して、スパーサにより付加する減衰をパラメトリックに求め、以下の知見を得た。

- ① スパーサの減衰係数を一定にした場合、バネ定数は小さい方が付加減衰が大きくなる。
- ② スパーサのバネ定数を一定にした場合、減衰係数には最適値がある。
- ③ ケーブルのねじり剛性は付加減衰に大きな影響を与える。

2) 並列ケーブルにスパーサを取り付けた振動実験を実施して、以下の知見を得た。

- ① 高減衰ゴムを用いたスパーサの場合には、両ケーブルの振動エネルギーより対数減衰率を評価できる。
- ② 高減衰ゴムを用いたスパーサによる付加対数減衰率は、0.03～0.1程度であった。

(2) 平成6年度の研究成果

1) 実大並列ケーブルによるスパーサの減衰機能に関する実験

3種類4タイプの高減衰ゴムを用いたスパーサと、1種類2タイプの摩擦型減衰機能付きスパーサを考案して、実大規模の並列ケーブル（SEEE-F360T、長さ $L=100\text{m}$ ）を用いて振動実験を行い、減衰性能の確認を行った。主要な結果を以下に示す。

- ① 実大ケーブルのたわみ振動およびねじり振動の特性を把握した。
- ② スパーサの種類により、減衰性能に振幅依存性のあるものとほとんどないものがある。
- ③ 実験の結果、得られた対数減衰率は、それぞれのスパーサにおいて最大0.08～0.1程度であった。

2) 風洞実験

高減衰ゴムを用いたスパーサ（せん断型）と摩擦型減衰機能付きスパーサ（摩擦型）について、ウェイクギャロッピングに対する制振効果を確認するために、風洞実験を行った。得られた主要な知見は以下のようである。

① スパーサの有無に関わらず、不安定なリミットサイクルを持つハード型のウェイクギャロッピングが発現するが、ウェイクギャロッピングの発現風速はせん断型スパーサ、摩擦型スパーサともにスパーサの減衰性能にほぼ比例して高くなった。

② スパーサのない状態で構造減衰が0.01程度であるケーブルに、構造減衰が0.1程度となる減衰性能を有するスパーサ（実大実験で得られた減衰性能に対応）を取り付けるとウェイクギャロッピングは 16m/s ($V_r=119$) まで発現しなくなった。さらに、スパーサの減衰性能を高めるともっとも良好な場合で 21m/s ($V_r=157$) まで上昇した。

③ スパーサのない状態で構造減衰を0.1程度まで高くすると、ウェイクギャロッピングの発現風速は約 22m/s ($V_r=166$) に上昇した。したがって、スパーサと他の制振手法を組み合わせることによっても発現風速を高めることが可能であると考えられる。

④ スパーサがない場合は上流側が固定されているかどうかに関わらず、ほぼ同一の挙動を示すが、

スパーサがある場合は上流側を固定するとウェイクギャロッピングの発現風速がやや低くなる傾向を示した。

3) 数値解析による評価

幾何学剛性を考慮した3次元複素固有値解析の結果、以下のような知見を得た。

① ケーブルのねじり剛性および回転慣性を適切に考慮すれば、バネ、ダッシュボット、剛体要素を用いたモデル化により、ケーブルに付加される減衰を十分な精度で予測できることが分かった。

② スパーサの減衰係数、バネ定数をパラメトリックに変化させて解析した結果、スパ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。

③ スパーサの減衰係数、バネ定数をパラメトリックに変化させて解析した結果、スパーサの減衰係数には最適値がある。

④ ケーブルのねじり剛性が増加すると、ケーブルに付加される対数減衰率も増加する。

⑤ スパーサ個数をパラメータとし、スパーサの減衰係数、バネ定数それぞれの和を一定とした条件下で解析した結果、スパーサの設置個数は、減衰の付加にはほとんど影響しない。同様に、ケーブルの固有振動数にもほとんど影響しない。

⑥ 幾何学剛性を考慮した3次元複素固有値解析のかわりに、簡易評価方法として2質点モデルを用いても十分な精度でケーブルの減衰付加を評価できることが分かった。また、2質点モデルの簡易式を求めた。

3.4.4. 今後の課題

今後の課題を以下に述べる。

① 今回、試作・実験を行ったスパーサにより付加された減衰は、対数減衰率で最大0.1程度であった。数値計算結果から判断すると減衰性能を多少向上させるスパーサを製作することは可能であるが、より大きな付加減衰が必要な場合には他の制振手法を組み合わせる方法も検討する必要がある。

② 振幅依存性があるスパーサすなわち、応力と変位が非線形関係にあると考えられる材料あるいはメカニズムを有するスパーサを用いた場合、設計振幅や要求減衰量を適切に設定する必要がある。

③ 今後実橋などにスパーサを適用するに際して、材料の許容応力度・耐久性・振幅依存性などを考慮した設計手法を確立するとともに、施工性についても検討の必要がある。

④ 今回、振動実験、風洞実験で確認したスパーサの減衰性能は、実橋におけるデータの蓄積などにより総合的に評価していく必要があると考える。

3.5 新しい構造力学的制振装置の開発に関する研究（その2）

3.5.1 研究の目的

斜張橋並列ケーブルの耐風制振対策として、ウェイクギャロッピングの制振に対応できる構造力学的制振装置の開発を行うことを目的とした。構造力学的制振装置として、ここでは特に、スパーサと減衰装置とを組合せた機構を検討対象とした。

3.5.2 研究の方法

本研究では「スパーサ付き並列ケーブル」を対象にその空力特性を風洞試験により調査し、振動特性を振動解析により把握した後、スパーサと減衰装置（高減衰ゴム）とを組合せた機構の減衰性能について検討した。

(1) スパーサ付き並列ケーブルの空力特性

スパーサで剛結された並列ケーブル（上流側ケーブルと下流側ケーブルの組合せ）を相似した2次元剛体模型を風洞気流中にバネ支持した状態で、並列ケーブルの振動試験を実施し耐風応答を計測した。風洞気流は乱れの微小な一様流とし、風向は並列ケーブルの耐風性で問題となることの多い橋軸直角方向を対象とした。ケーブル間隔は、2D、3D、4D（D：ケーブル径）の3ケースを考えた。

(2) スパーサ付き並列ケーブルの振動特性

スパーサ付き並列ケーブルの振動解析を実施し、スパーサによるケーブル拘束の影響を検討した。ケーブルの振動解析では、通常無視されているケーブルの曲げ剛性とねじれ剛性も考慮した。

(3) 新しい構造力学的制振装置（スパーサと高減衰ゴムとを組合せた機構）の減衰性能

新しい構造力学的制振装置として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した場合の減衰性能を複素固有値解析により調査した。

3.5.3 研究成果の概要

(1) スパーサ付き並列ケーブルの空力特性

1) 本研究で実施した風洞実験では、並列ケーブルをスパーサで剛結された2本のパイプとして扱っているため、ねじれ振動（並列ケーブルが逆位相で振動）のとき、上流側ケーブルと下流側ケーブルの回転角は同一となる。これはスパーサで剛結された実際の並列ケーブルにおけるスパーサ近傍の動きを相似したものと考えられる。

2) スパーサ連結後の並列ケーブルの振動モードが、曲げ1自由度振動（並列ケーブルが同位相で振動）またはねじれ1自由度振動（並列ケーブルが逆位相で振動）のときと、曲げねじれ2自由度振動のときとで、曲げ振動またはねじれ振動に対応して発現する空力現象に大きな差は認められない。すなわち、並列ケーブルの耐風対策において、曲げねじれの連成を便宜的に無視して、曲げ1自由度振動とねじれ1自由度振動とに対して個別に耐風安定化を図ることができるものと考えられる。

3) スパーサ付き並列ケーブルのケーブル間隔が、2D→3D→4Dと広がるにつれて、発散振動（ウェイクギャロッピング）の発現風速は高くなり、その意味での耐風性は良くなっている。

4) ケーブル間隔3Dの場合について構造減衰による耐風安定化効果を調査した。ねじれ振動について

述べると、構造減衰 $\delta=0.01$ のとき発現する不安定なねじれ定常振動（小振幅では減衰し、大振幅では発散するねじれ振動）は、構造減衰 $\delta=0.02$ になると姿を消す。他方、曲げ振動については、構造減衰 $\delta=0.007$ （実橋換算値）のときには曲げ発散振動が発現するが、構造減衰 $\delta=0.014$ （実橋換算値）になると、不安定な曲げ定常振動（小振幅では減衰し、大振幅では発散する曲げ振動）に変わって、ケーブルの耐風安定性は向上する傾向が認められる。なお、この対風挙動はすでに述べているように、スペーサで剛結された並列ケーブルのスペーサ近傍における空力特性に対応したものと考えられる。

(2) スペーサ付き並列ケーブルの振動特性

1) スペーサと並列ケーブルとの結合条件で、ケーブル軸回りの回転を解放すると、微小振幅の範囲ではスペーサによるケーブル振動の拘束効果はなくなる。ケーブル軸回りの回転を拘束すると、ねじれ振動（並列ケーブルの面外逆位相モード）の振動数が1.5～2倍と高くなる。すなわち、スペーサによるケーブル振動の拘束効果はケーブル軸回りの拘束度ひいてはケーブルのねじれ剛性の影響を敏感に受けることになる。

2) スペーサを等間隔配置する場合、制振対象とするケーブル振動の最高次数よりスペーサの個数を1個以上多くすれば、スペーサ配置によってねじれ振動の振動数を高めることができる。例えば、ケーブル振動の制振対象次数が2次のとき、スペーサ数は3個とすれば良い。この場合、スペーサ数を4個以上に増やしてもねじれ振動数への効果はあまり変わらない。

(3) 新しい構造力学的制振装置（スペーサと高減衰ゴムとを組合せた機構）の減衰性能

1) すでに述べたように、スペーサによってケーブル軸回りの回転を拘束すると、ねじれ振動数が高くなるが、このことは、それだけ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を意味する。

したがって、この部分（ケーブルとスペーサ取付部の間）に高減衰ゴムを挟んで、ゴムのせん断変形を許す構造にすれば、ゴムの内部減衰によって、並列ケーブルのねじれ振動における構造減衰の増加を図ることができると考えられる。

2) 上記の考え方に基づいて、ケーブルとスペーサ取付部の間の回転部に高減衰ゴムを挟み込んだ「新しい構造力学的制振装置」に対して、複素固有値解析を実施し、適当な減衰係数の高減衰ゴムを用いることによって、ねじれ振動の構造減衰を増加させることができることを数値的に確認した。

3.5.4 今後の課題

本研究で開発した制振装置によって、並列ケーブルが逆位相で振動するねじれ振動の構造減衰を高めて耐風性を向上させることはできるが、並列ケーブルが同位相で振動する曲げ振動に対しては減衰効果を期待することはできない。今回の制振装置によって、並列ケーブルのねじれ振動が抑制されとしても、仮に、曲げ振動が発生する場合には別途、減衰機構を検討していく必要がある。

3.6 空力的制振手法の開発に関する研究

3.6.1 研究の目的

本研究では実橋におけるウェークギャロッピングの振動問題について、ケーブル表面に粗度を与えることによる空気力学的な制振効果を検討する。また、風洞実験により制振対策の効果の確認と制振メカニズムの解明を目的とした。

3.6.2 研究の概要

(1) 空力的制振対策（その1）

本研究においては、対象とする並列ケーブルを上下1自由度支持の単純な2次元バネ支持試験法によって、ケーブル表面形状の違いによるウェークギャロッピングの抑制効果を調べた。表面形状は以下に示す5種類を対象とした。

- A型……………滑面
- B型……………円形孔（空気抜き付き）
- C型……………円形突起
- D型……………縦リブ突起（空気抜き付き）
- E型……………螺旋リブ突起

B型の円形孔モデルの空気抜き穴を閉鎖したB'型を補足的に実施した。

また、振動の発生機構と制振機構のメカニズムの解明を目的に、A型、B型、C型の3模型に対して静的空気力測定試験、交流測定試験の基礎試験を行った。

風洞試験は、ケーブル径 $D=100\text{mm}$ 、ケーブル間隔を $3D$ として行った。

バネ支持試験結果より以下の様な知見が得られた。

- 1) 滑面ケーブルでは、無次元風速 $U_r=20$ 付近からハード・フラッター的ウェークギャロッピングが発生する。
- 2) 上流側ケーブルの渦励振については、螺旋リブを施した模型Eが最も有効である。下流側ケーブルについては、全ての模型で限定振動の発生が認められる。
- 3) 対策案のうち、模型B'を除く4案については上記に示した条件の下での実験においては、ウェークギャロッピングの抑制が可能であると言える。

基礎試験の結果より以下の様な知見が得られた。

- 1) 模型Aの揚力係数 C_L は、他の2模型に比べて特徴的である。すなわち、迎角 $7^\circ \sim 13^\circ$ の範囲で顕著な負勾配となる。
- 2) 模型Bでは、ウェーク幅が他の模型より小さい。また、模型Bでは、下流側ケーブル中心軸レベル付近の平均風速の変化が他より大きい。これらは、ケーブル表面の吸い込み流れの効果が現れているものと思われる
- 3) 下流側ケーブル中心軸付近の乱れ強さについて、 I_w のパターンは各模型ともほぼ同様であるが、

I_v のパターンが、模型A、模型Cと模型Bで異なる。前者では、ケーブル軸中心レベル付近で低下するが、後者では低下せず I_v と同様のパターンとなる。

4) 交流のスペクトルには各ケースとも卓越周波数が認められた。卓越周波数から求めた無次元風速より渦励振が確認された。

5) 模型Aの下流側ケーブルに対する相対迎角より、静的揚力係数 C_L の負勾配がウェークギャロッピングの発生に関係する可能性が指摘された。

(2) 空力的制振対策 (その2)

本研究では、レインバイブレーションに対して制振効果が認められたストライプ方式の空力的制振対策をウェークギャロッピングに適用した場合の制振効果を風洞試験により確認した。ストライプ方式の空力的対策とは、ケーブルの表面にU字型の溝をストライプ状につけ、表面粗度効果により見かけのレイノルズ数を増加させ、後流を縮退させることで制振しようとするものである。

風洞試験は、ケーブル間隔 $3D$ と $4D$ を中心にケーブル間の距離を変化させ、下流側のケーブルの応答挙動を観測した。このとき、上流側ケーブルを拘束した場合と自由度を持たせた場合について試験を行った。試験の結果より以下に示す様な知見が得られた。

1) 上流側ケーブルに主流直角方向に1自由度を与えた試験結果において、ケーブル径 $D=50\text{mm}$ でケーブル間隔 $S=4D$ の場合、ストライプ方式ケーブルには、ノーマルケーブルで見られた不安定振動が発現しない。

2) 上述1)の試験において、ノーマルケーブルとストライプ方式ケーブルの下流側ケーブルの $V-A-\delta$ 図を比較すると、両者は明らかに異なっており、作用する空気が相違していることがわかる。

3) 上述1)の条件の内、ケーブル間隔 S を $S=2D$, $3D$ にした場合は、ノーマルケーブルとストライプ方式ケーブルの応答振幅は、同等か、風速域によってはストライプ方式ケーブルの方が大きくなっており、上流側ケーブルの振動も発生している。発振風速もノーマルケーブルとストライプ方式ケーブルではあまり変化していない。ストライプ方式ケーブルの最大振幅は、 $1.5D$ 以上となっており、これらのケーブル間隔ではストライプ方式ケーブルの制振効果は考えにくい。

4) $D=100\text{mm}$ の場合でも $D=50\text{mm}$ の場合と同様の結果となった。

5) 以上のことより、ストライプ方式ケーブルのウェークギャロッピングに対する制振効果は有効でない場合もあることがわかった。しかし、ケーブル間隔をある程度とった場合 (本研究においては $4D$) にはストライプ方式ケーブルはウェークギャロッピングに対しての制振効果の可能性があるとと言える。しかし、本研究のみでのストライプ方式ケーブルの制振効果を評価することには無理があり、今後の様々な角度からの検討が必要であると考ええる。

3.7 数値解析による制振効果の評価に関する研究

(1) 研究の目的

ウェークギャロッピングに対する機械的制振装置には、通常、ケーブルの相互連結、スペーサー連結、せん断ダンパー、高減衰ゴム等が用いられている。これらの制振装置のうち、後者のせん断ダンパーおよび高減衰ゴムについては取り付け位置と付加減衰の関係に関する幾つかの研究成果が報告されているが、前者の相互連結およびスペーサー連結装置に対しては、取付け位置と制振効果の関係について系統的に整理されたものは少ない。本研究では、スペーサー連結およびスペーサーと相互連結装置の組合せによる制振機構について、取付け位置とその制振効果の関係をパラメトリックに解析整理することにより、同制振装置を適用する場合の基礎資料を得ることを目的とする。

(2) 研究内容

数値解析による制振効果の評価に関する研究として平成5年度はスペーサー連結の取付け位置とその制振効果について検討を行った。平成6年度は、スペーサーと相互連結材を併用した場合の制振効果および連結材に発生する張力について検討を行った。

(3) 研究結果

平成5年度のスペーサーの制振効果の検討では、以下に示す様な結果が得られた。

- 1) 両ケーブルが同位相で振動した場合にはスペーサーでの減衰の向上は、数値解析上確認できず、両ケーブルが逆位相で振動した場合にスペーサーの減衰効果は数値解析上確認できた。
- 2) 片側ケーブルの張力を変動させたケースでは、同位相で振動する場合においても減衰の向上が確認できた。取り付け位置による減衰の向上は中央を連結する場合よりも、0.2ℓの位置に設置した場合の方が減衰の向上効果が大きいことがわかった。

平成6年度の減衰機構付きスペーサー＋相互連結材の制振効果についての検討では以下の様な結果が得られた。

- 3) 解析では、主塔・主桁の減衰付加による構造系全体としての減衰の上昇は確認できたものの、実橋梁（櫃石島橋・岩黒島橋）で確認されているような相互連結材による大幅な減衰の上昇は数値解析では確認できなかった。これは、実橋梁の場合には、ケーブルと定着金具との摩擦、連結材の延びによる減衰があるものと考えられているが、それらの条件が数値解析モデルには完全には反映することが難しいためと思われる。

第4章 本年度の研究成果

4.1 本年度研究成果の概要

4.1.1 総括

平成6年度は、ウェークギャロッピングの特性に関する風洞実験として、バネ支持実験に加え、定常空気力、非定常空気力の計測および可視化実験を行った。また、新しい制振対策として、減衰付加型ダンパーおよびケーブル被覆管の改良についての実験および解析が行われた。また、数値解析によりケーブル連結手法と減衰付加型ダンパーを組み合わせた場合の制振効果について検討した。

本年度は共同研究の最終年度であり、全体としての成果物として、共同研究が終了した時点における知見より「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)」が取りまとめられた。

4.1.2 ウェークギャロッピングの特性

(1) ケーブル間隔、水平偏角、迎角の影響

ウェークギャロッピングの発現に対するケーブル間隔、水平偏角、迎角の影響については、昨年度までの結果を裏付けるデータが得られた。また、空気力の面からもこれらの影響が明らかになり、昨年度までに得られた知見が裏付けられた。

(2) 振動の特性

ケーブル間隔が小さい場合に発生するウェークギャロッピングは不安定なリミットサイクルを有するハード型であり、大きくなるにつれて徐々にソフト型に移行することがわかった。

(3) レイノルズ数の影響

ケーブル間隔4Dにおいて、ケーブル径 $D=50\text{mm}$ でソフト型、 $D=100\text{mm}$ でハード型のウェークギャロッピングが見られたことから、レイノルズ数がウェークギャロッピングの振動特性に影響することが示された。

(4) ウェークギャロッピング発生メカニズム

一連の実験より、ウェークギャロッピングの発生には上流側のケーブルから発生する外縁流がギャップフローとなることが関与していることが示唆された。

4.1.3 構造力学的制振装置

減衰機能付きスパーサにより、ウェークギャロッピングの発現風速が上昇することが風洞実験により確認された。また、実物ケーブルによる振動実験より、減衰性能の確認が行われた。

幾何学剛性を考慮した3次元複素固有値解析によりスパーサの取り付け位置、バネ定数、設置個数などを変化させ減衰性能を評価した。2質点モデルを用いて、減衰の簡易評価式を作成した。

減衰機能付きスパーサとケーブル連結手法を組み合わせた場合の等価質量および対数減衰率の変化を複素固有値解析により調査した。また、相互連結時に連結ワイヤに発生する張力を推定した。

4.1.4 空力的制振装置

今年度は、被覆管の改良として、風洞実験によりUストライプ方式の有効性を確認した。この実験より、ケーブル間隔によってはウェークギャロッピングの制振が可能となったことが明らかとなった。

4.2 ウェイクギャロッピングの特性予測に関する研究

(1) 研究の目的

本研究は、主に前年度に明らかにされたウェイクギャロッピングの様々な振動応答特性の発生メカニズムを究明し、応答予測手法（マニュアル）の構築や振動抑制方法（制振対策）の開発のためのデータを得ることを目的として実施された。

(2) 研究の方法

以下に参加各機関が本年度実施した内容をまとめて表-4.2.1 示す。

表-4.2.1 平成6年度実施内容一覧

No	参加機関	実施項目
1	三井造船(株)	＜振動発生メカニズムの究明＞ ・ 3 分力試験 ・ 非定常空気力測定試験 ・ 煙による流れの可視化
2	住友重機械工業(株)	＜振動特性の把握＞ ・ バネ支持試験 自由度、ケーブル間隔、直径を変化
3	日本鋼管(株)	＜振動発生メカニズムの究明＞ ・ 定常空気力測定試験 ・ 非定常空気力測定試験
4	石川島播磨重工業(株)	＜振動発生メカニズムの究明＞ ・ 非定常圧力測定試験 ・ 定常圧力測定試験

(3) 研究成果の概要

以上の研究の結果、ウェイクギャロッピングの振動発生メカニズムを明らかにするとともに、空気力の面からも前年度に報告された様々な振動応答特性を裏付けることができた。

具体的な内容を以下にまとめて示す。

- 1) ウェイクギャロッピングが振動系の振動数に因らず発生することが空気力の面からも裏付けできた。
- 2) ケーブル間隔が3 Dを境にケーブルの振動応答特性が大きく変化する現象を、空気力の面からも裏付けることができた。
- 3) 相対迎角7°を境にケーブルの振動性状が変化した現象を、空気力の面からも裏付けることができた。
- 4) また上記はギャップフローの発生と対応づけられ、ウェイクギャロッピングの振動発生メカニズム

としては、2本のケーブルの間のギャップフローの存在が大きく関わっているものと考えられる。

5) 上流側ケーブルの振動の自由度は下流側ケーブルに対して定性的な影響は与えない。

6) 偏角が($0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ の範囲では)大きくなるにつれて応答特性が若干安定化することが空気力の面からも裏付けられた。

7) ケーブル径が異なると、レイノルズ数の影響により応答特性(ソフト型又はハード型)が敏感に変化する。

(4) 今後の課題

ウェイクギャロッピングの発生メカニズムについては、定常圧力及び非定常圧力を計測し、その特性を明らかにすることにより、定性的には説明することができた。しかしながら、定量的には計測精度等の問題あり、今後の課題とするところである。

4.2.1 ケーブル間隔と迎角の影響(その1)

(1) 研究概要

斜張橋並列ケーブルのケーブル間隔とその迎角がウェイクギャロッピングにおよぼす影響を下流側ケーブルの耐風応答特性の面から明らかにすることを目的とした。

そこで、平成5年度には、上・下流のケーブル間隔とその迎角を、ケーブルの水平間隔 S_H と垂直間隔 S_V に置き換え—ケーブル径を D とすると—水平間隔 $S_H = 2D \sim 6D$ 、垂直間隔 $S_V = 0 \sim 2D$ の範囲で、ばね支持試験を実施した。このほか、ケーブル径、構造減衰、振動数の影響についても試験を実施した。

この結果、ケーブル水平間隔 $S_H = 2D \sim 3D$ 、垂直間隔 $S_V = 0$ では、下流側ケーブルの振動数が振幅に依存して変化することが確認された。とくに、上・下流側ケーブルの相対角度が $6^{\circ} \sim 7^{\circ}$ を境にしてケーブルの振動数が急変することなどが明らかとなった[4]。

平成6年度は、この原因を探究するため、試験対象領域を $S_H = 2D \sim 4D$ 、 $S_V = 0$ に限定し、下流側ケーブルについて、

- ① 三分力天秤による定常空気力の測定
- ② 強制振動法による非定常空気力の測定
- ③ 煙風洞によるながれの可視化

をおこなった。

(2) 試験内容

1) 定常空気力測定試験

下流側ケーブルに作用する定常空気力が2本のケーブル間の距離とその迎角によってどのように変化するかを調べるため、この定常空気力を三分力天秤を用いて測定した。ケーブル模型の配置を図-4.2.1.1に、試験状態の一覧を表-4.2.1.1に示す。

なお、このときのケーブル模型の配置は、試験装置の都合により、前年度におこなったばね支持試験とは異なる。ばね支持試験では、ケーブル中心軸間の水平間隔 S_H と垂直間隔 S_V をパラメータとしたが、定常空気力測定試験では、ケーブル中心間隔 S と迎角 α をパラメータとした。

定常空気力の測定は、上流側ケーブルを風路壁(固定端板)に固定し、下流側のケーブル模型のみを

三分力天秤に取り付け、間隔Sを保ちながら模型を上下させることによって迎角 α を変えながら、この時、下流側ケーブルのみに作用する空気力を測定した。定常空気力の評価時間は約30秒である。

2) 非定常空気力測定試験

下流側ケーブルに作用する非定常空気力が振幅 η と振動数 f によってどのように変化するのかを調べるため、この非定常空気力を強制加振式非定常空気力測定装置を用いて計測した。ケーブル模型の配置を図-4.2.1.2に、試験状態の一覧を表-4.2.1.2に示す。なお、非定常空気力測定時におけるケーブル模型の配置は $S_H = 2D$ 、 $S_V = 0$ である。

非定常空気力の測定は、上流側のケーブル模型を風路内に固定し、下流側のケーブル模型を加振装置に取り付け、下流側ケーブルに作用する非定常空気力のみを測定した。非定常空気力の評価時間は、加振周期の120波数分である。

センサーから検出された空気力から加振振動数応答成分を求め非定常空気力 L とした。 L は定常空気力と比較するため、 $1/2 \rho V^2 D$ で無次元化した。したがって、非定常空気力 L は、

$$L = \frac{1}{2} \rho V D^2 (C_{LR} + C_{LI}) e^{i\omega t}$$

である。また、非定常空気力の振幅 L_0 は、

$$L_0 = \frac{1}{2} \rho V D^2 (C_{LR}^2 + C_{LI}^2)^{1/2} = \frac{1}{2} \rho V D^2 \cdot L_0'$$

である。

3) ながれの可視化試験

上・下流側ケーブルを静止させた場合—つまり、定常空気力測定試験に相当する場合—について、煙風洞を用いて両ケーブルまわりのながれの可視化をおこなった。試験条件の一覧を表-4.2.1.3に示す。なお、ケーブル模型の配置は図-4.2.1.1と同じである。

可視化の方法は、ケロシンを霧状にしたものを模型の上流側からくし型ノズルを用いて吹き出し、連続光による照明のもと撮影をおこなった。

(3) 風洞装置

定常空気力測定試験および非定常空気力測定試験に使用した風洞施設は、三井造船株式会社昭島研究所「構造物用低速風洞」である。風洞の測定部は高さ3m×幅2mの矩形断面で、長さ20mである。これを閉鎖型で使用した。また、風速範囲は0.3~20m/sである（風洞の主要目ならびに概観図は文献1）を参照のこと）。

ながれの可視化試験に使用した風洞施設は、同じく三井造船株式会社昭島研究所にある「煙風洞」である。風洞の測定部は高さ0.8m×幅0.15mの矩形断面で、長さ1.5mである。このうち、可視化範囲は、高さ0.65m×長さ1.3mである。また、風速範囲は、1~10m/sである。表-4.2.1.4に主要目を、図-4.2.1.3に概観図を示す。

(4) 試験結果

1) 定常空気力特性

風速 9 m/s と 17 m/s の測定結果には有意な差異が認められなかったので、風速 9 m/s での測定結果として、定常空気力係数と迎角の関係を図-4.2.1.4から図-4.2.1.8に示す。下流側ケーブルに作用する揚力および抗力は、ケーブル間隔 S が $3D$ と $3.5D$ の間で大きく変化する。

① $S \leq 3D$ のとき

まず、揚力係数 C_L の特性は、

a $|\alpha| \leq 5^\circ$ では、 C_L はほぼ一定の勾配であり、緩やかに（絶対値は）増加する。

b $5^\circ \leq |\alpha| \leq 8^\circ$ では、 C_L は一転して急勾配で増加し、顕著なピークが現れる。

c $|\alpha| > 8^\circ$ では、 $|\alpha|$ が大きくなるにつれて、 C_L は減少してゆき、負勾配が現れる。

準定常理論を適用できるのであれば、この $S \leq 3D$ の領域でのハード型のギャロッピングの発生には、この負勾配の発生が密接に関連しているものとも考えられる（詳しくは、4)の3.6.2の(4)参照のこと）。しかし、ここで示した空気力は、上流側ケーブルから放出される渦によって下流側ケーブルに作用する大きく変動している空気力（ある振動数成分を有している）を平均したものであること、さらに、下流側ケーブルが（ある振動数で）振動することなどを考慮すると、単純に準定常理論を適用することは困難であると思われる。

つぎに、抗力係数 C_D の特性は、

a $|\alpha| \leq 5^\circ$ では、 $S_H = 2D$ のとき、 C_D は下に凸となるが、 S_H が $2D$ から $2.5D$ へと広がるにつれて、上に凸となる。

b $5^\circ \leq |\alpha| \leq 8^\circ$ では、 C_L が急増してピークが現れるのと同じように、 C_D も急変して、ピークが現れる。しかし、この変化の度合いは C_L ほど顕著ではない。

c $|\alpha| > 8^\circ$ では、 $|\alpha|$ が大きくなるにつれて、 C_D は連続的に増加してゆく。

② $S \geq 3.5D$ のとき

揚力係数 C_L には、ピークがなくなり、なだらかな、ほぼ一定の勾配で増加してゆくだけになる。

抗力係数 C_D も、 C_L と同様に、なだらかになり、ピークが現れなくなる。

2) 非定常空気力特性

50ϕ の下流側ケーブルに作用する非定常空気力の振幅と風速の関係を図-4.2.1.9から図-4.2.1.14に示す。これらの図より、非定常空気力振幅 L_o^* は、振動数 f に依存する傾向が認められるものの、しかし、 f よりも加振振幅 η に依存する傾向が強い。なお、 L_o^* は $\eta/D = 0.4$ で極大値をとる。

① $\eta/D \leq 0.2$ のとき

L_o^* は、風洞風速 V が大きくなるにつれて、0 に収束してゆく。また、加振振動数 f が小さいほど、 L_o^* は大きめの値をとる。

② $\eta/D = 0.3$ のとき

$f = 1.2 \sim 2.0\text{ Hz}$ では、 V が大きくなるにつれて L_o^* は大きな値となる。しかし、 $f = 0.2 \sim 0.8\text{ Hz}$ では、現象の変わり目であるためか、揚力の応答波形の非定常性が顕著となる。このため、揚力の振幅

が不均一となり、最大振幅よりも平均振幅は過小評価されるので、 L_o^* は $V > 10 \text{ m/s}$ でしだいに小さくなってゆく。

③ $\eta/D \geq 0.4$ のとき

L_o^* は $V > 4 \text{ m/s}$ ではほぼ一定の値をとる。また、 f が大きいほど、 L_o^* は大きな値となる。

さらに、非定常空気力係数 C_{LR} および C_{LI} と風速の関係を図-4.2.1.14から図-4.2.1.18に示す。これらの図より、非定常空気力係数 C_{LI} は、 η によって f に依存する度合いが異なる。

① $\eta/D \leq 0.2$ のとき

C_{LI} は風洞風速 V および加振振動数 f によらず0である(図-4.2.1.14および図-4.2.1.15)。

② $0.3 \leq \eta/D \leq 0.4$ のとき

C_{LI} は f に依存するようになる。とくに、 f が大きくなるにつれて C_{LI} も正の大きな値となり、 f が大きくなるにつれて負減衰効果が大きくなることを示す(図-4.2.1.16および図-4.2.1.17)。

③ $\eta/D \geq 0.5$ のとき

C_{LI} はふたたび f に依存しなくなり、こんどは V に依存するようになる。つまり、 C_{LI} は V の増大とともに負から正へと変化する(図-4.2.1.18)。

3) ながれの可視化

迎角 $\alpha = -6^\circ \sim -11^\circ$ における上・下流側両ケーブル周りのながれの可視化写真を写真-4.2.1.1から写真-4.2.1.3に示す。なお、シャッタースピードは、 $1/30$ 秒である。したがって、写真は $1/30$ 秒間の平均流脈線を示している。

① $\alpha = -6^\circ$ のとき

上流側ケーブルの上面から剥離したながれは、下流側ケーブルの上面に再付着した後、そのまま下流へとながれている。したがって、下流側ケーブルは上流側ケーブルの死水領域内にあり、下流側ケーブルには大きな空気力が作用していない様に見える。

② $\alpha = -8^\circ$ および -11° のとき

下流側ケーブルに再付着するながれの位置が、 α が大きくなるにつれて、ケーブルの下の方へとずれてゆく。このため、下流側ケーブルに再付着したながれは、下流側ケーブルの下面にまで回り込むようになる。この回り込みによって、ケーブルの下方向にさらに大きな空気力が作用している様に見える。

写真より下流側ケーブルまわりのながれは、 $|\alpha| = 6^\circ$ と 8° の間で大きく変化している。つまり、 $|\alpha| \leq 6^\circ$ では、ながれはouter accelerated flowとなり、 $|\alpha| \geq 8^\circ$ では、gap flowが発生する。このgap flowの発生によって、下流側ケーブルに作用する定常空気力に変化が生じたと考えられる。

(5) まとめ及び今後の課題

1) 50ϕ の下流側ケーブルに作用する定常空気力は、ケーブル間隔 $S \leq 3D$ と $S \geq 3.5D$ で、その特性が大きく異なる。とくに、 $S \leq 3D$ では、ウェークギャロッピングの発生の可能性が定常空気力の特性により裏付けられた。しかし、 $S \geq 3.5D$ では、ながれの遅れの作用(位相差)を考慮する必要がある。

あると思われる。

- 2) 50φの下流側ケーブルに作用する定常空気力および非定常空気力は、振幅 $\eta/D \leq 0.2$ （または、迎角 $\alpha \leq 6^\circ$ ）と $\eta/D \geq 0.3$ （ $\alpha \geq 8^\circ$ ）で、急変した。さらに、非定常空気力係数 C_{Li} は $\eta/D=0.3 \sim 0.4$ では振動数に依存して、大きな励振力が作用するようになる。このことから、ケーブルの振動状態が変化したものと考えられる。
- 3) ながれの可視化より、上流側ケーブルに対する下流側ケーブルの相対迎角 α が 7° を越えると gap flow が発生する。この gap flow の発生が、定常空気力および非定常空気力の変化に密接に関係していると考えられる。
- 4) 今後機会があれば、振動中のケーブル周りのながれの（時刻歴での）可視化などをおこない、ウェークギャロッピングの発生のメカニズムの調査を進めたい。

参考文献

- 1) 白土博道：複数構造物の空気力学的挙動に関する研究、博士論文、京都大学、1988年。
- 2) 宇都宮英彦、鎌倉米康：近接する並列円柱系の空気力学的挙動、土木学会論文報告集、第336号、1983年8月。
- 3) 建設省土木研究所構造橋梁部、財団法人土木研究センター、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）、1993年3月。
- 4) 建設省土木研究所構造橋梁部、財団法人土木研究センター、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）、共同研究報告書、第108号、1994年9月。

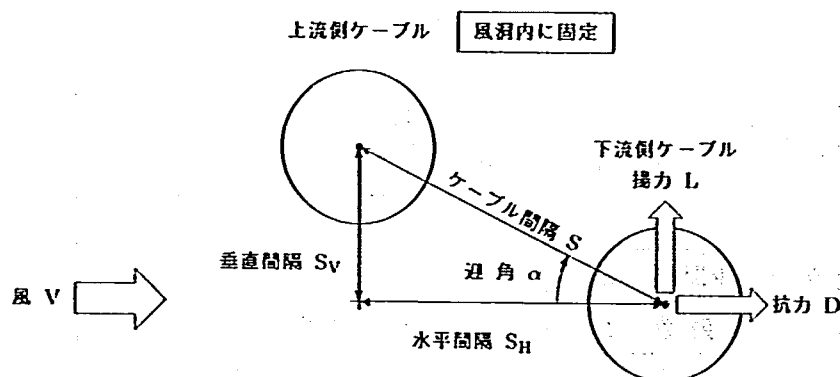


図-4.2.1.1 定常空気力測定におけるケーブル模型の配置

表-4.2.1.1 定常空気力測定の試験条件

項 目	実 験 値
ケーブル径 D	0.050 m (アルミ製)
スパン長 L	1.590 m
ケーブル間隔 S	2 $D \sim$ 4 D (0.5 D ピッチ)
迎 角 α	$-15^\circ \sim +15^\circ$ (1° ピッチ)
風洞風速 V	9 m/s, 17 m/s
レイノルズ数 Re	3×10^4 , 6×10^4

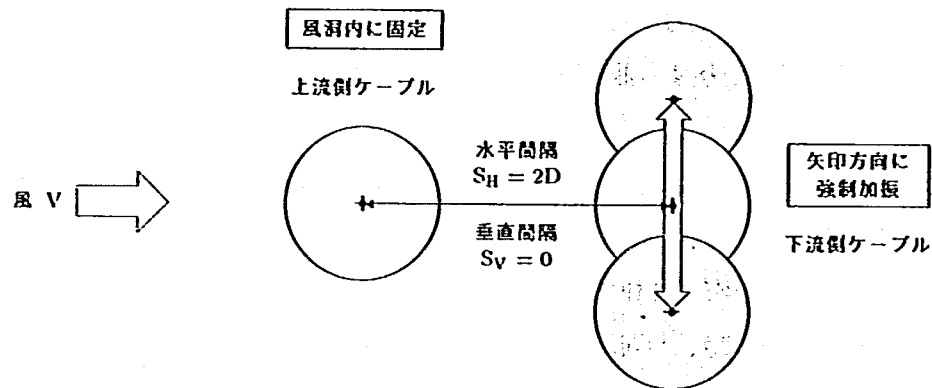


図-4.2.1.2 非定常空気力測定におけるケーブル模型の配置

表-4.2.1.2 非定常空気力測定の試験条件

項 目	実 験 値
ケーブル径 D	0.050 m (アルミ製)
スパン長 L	1.590 m
ケーブル間隔 S	$S_H = 2D$, $S_V = 0$
加振振動数 f	0.4~2 Hz (0.4 Hzピッチ)
加振振幅 η	5~25 mm (5 mmピッチ), 40 mm
風洞風速 V	2~20 m/s (2 m/sピッチ)
レイノルズ数 Re	$0.7 \sim 7 \times 10^4$

表-4.2.1.3 ながれの可視化の試験条件

項 目	実 験 値
ケーブル径 D	0.050 m (木製)
スパン長 L	0.150 m
ケーブル間隔 S	$S_H = 2D$ $S_V =$ (所定の α となるように)
迎 角 α	$-4^\circ \sim -16^\circ$
風洞風速 V	8 m/s
レイノルズ数 Re	3×10^4

表-4.2.1.4 煙風洞装置主要目

項 目	主 要 目
名 称	煙風洞
型 式	吸込型 (エッフェルタイプ)
測 定 部 寸 法	0.8m 高×0.15m 幅×1.5m 長 (可視範囲 0.65m 高×1.3m 長)
風 速 範 囲	1 m/s ~ 10 m/s
乱 れ 強 さ	0.7%以下
風 速 分 布	±0.3%以下
付 属 設 備	煙発生装置 ほか

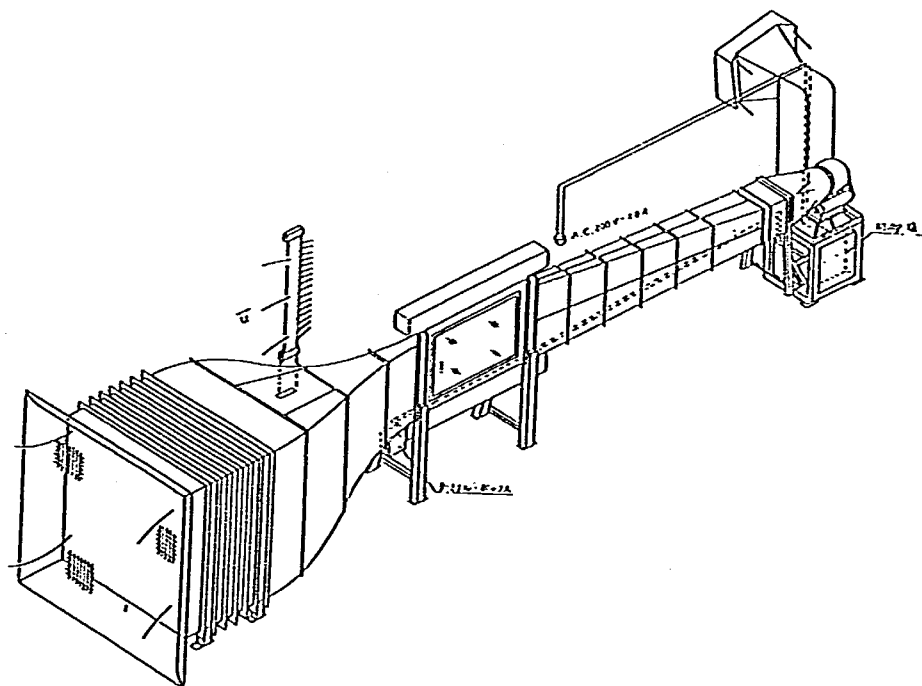


図-4.2.1.3 煙風洞装置概観

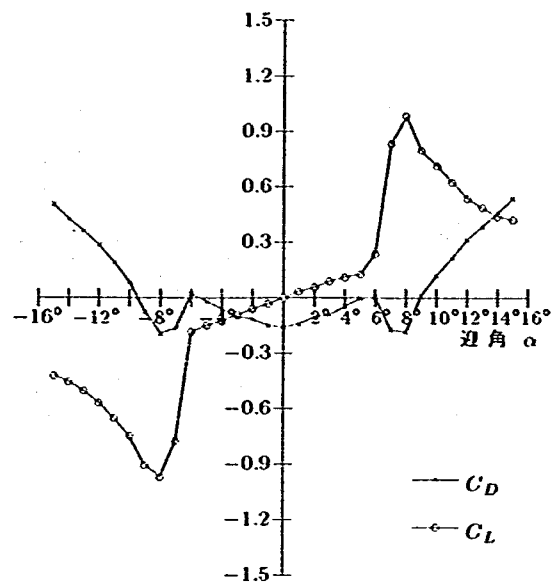


圖-4.2.1.4 定常空氣力係數： $S = 2D$ 、 $V = 9 \text{ m/s}$

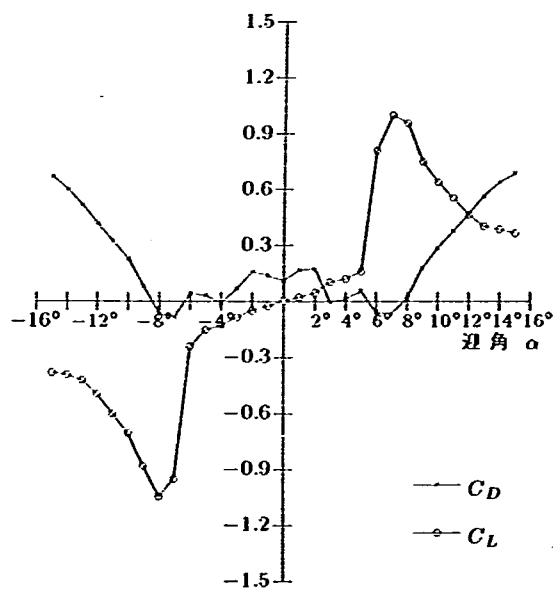


圖-4.2.1.5 定常空氣力係數： $S = 2.5D$ 、 $V = 9 \text{ m/s}$

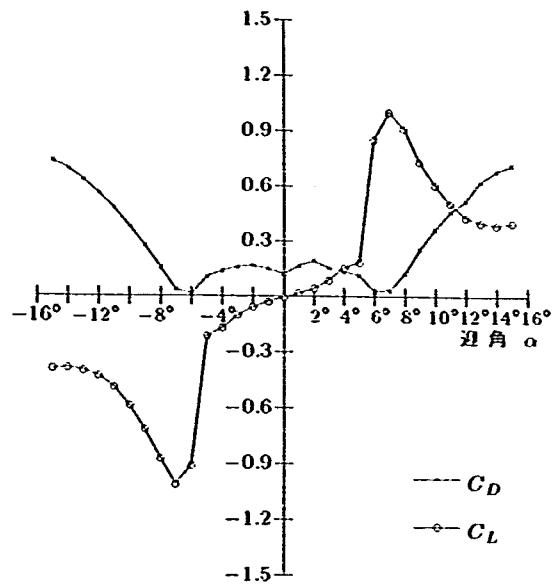


圖-4.2.1.6 定常空氣力係數： $S = 3D$ 、 $V = 9\text{ m/s}$

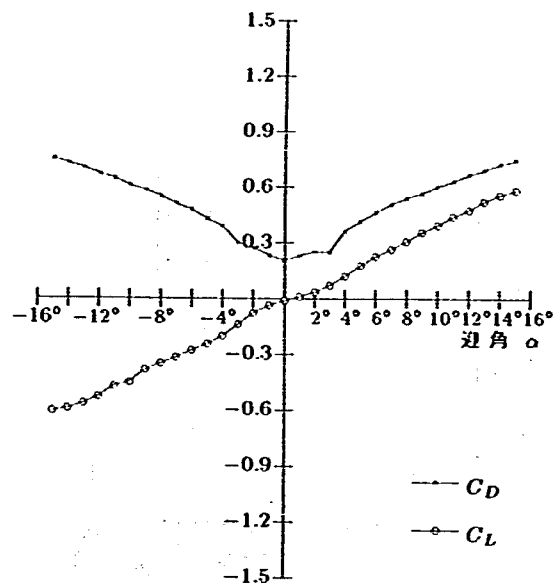


圖-4.2.1.7 定常空氣力係數： $S = 3.5D$ 、 $V = 9\text{ m/s}$

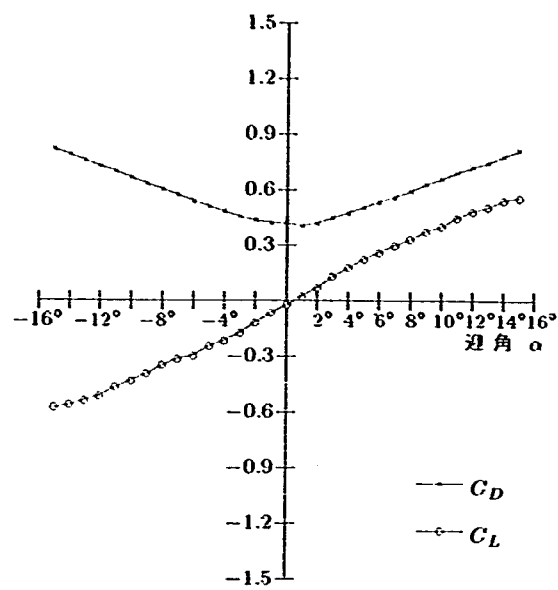


圖-4.2.1.8 定常空氣力係數： $S = 4 D$ 、 $V = 9 \text{ m/s}$

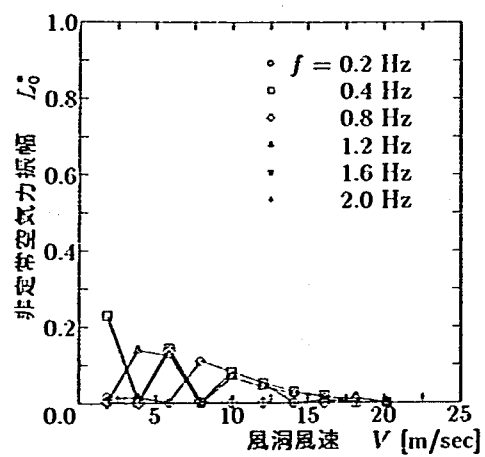


圖-4.2.1.9 非定常空氣力振幅： $S_H = 2 D$ 、 $\eta/D = 0.1$

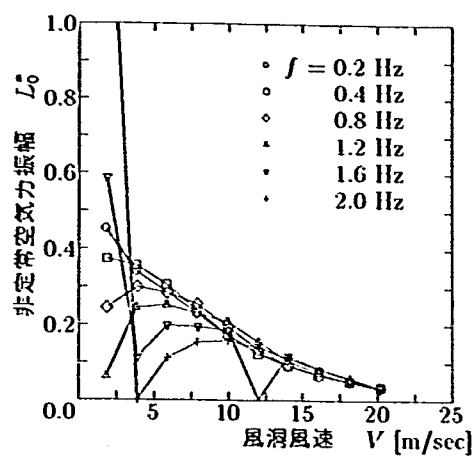


圖-4.2.1.10 非定常空氣力振幅： $S_H = 2D$ 、 $\eta/D = 0.2$

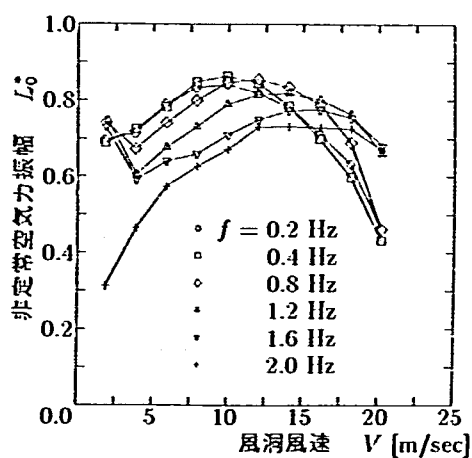


圖-4.2.1.11 非定常空氣力振幅： $S_H = 2D$ 、 $\eta/D = 0.3$

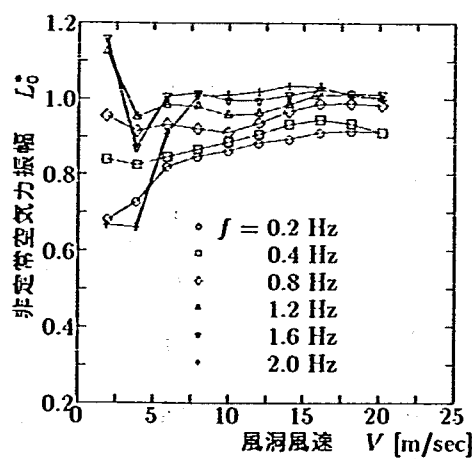


圖-4.2.1.12 非定常空氣力振幅： $S_H = 2D$ 、 $\eta/D = 0.4$

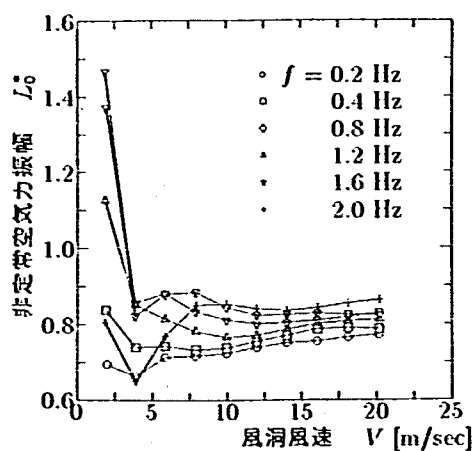


图-4.2.1.13 非定常空气力振幅: $S_H = 2D$ 、 $\eta/D = 0.5$

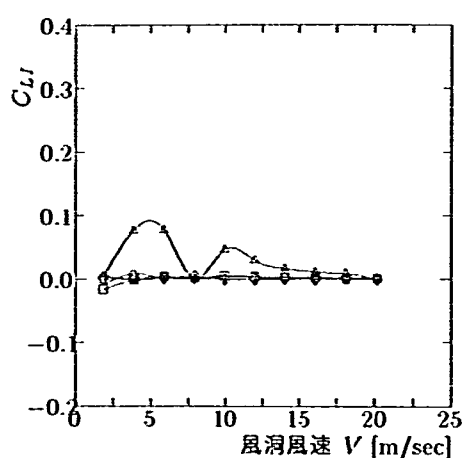
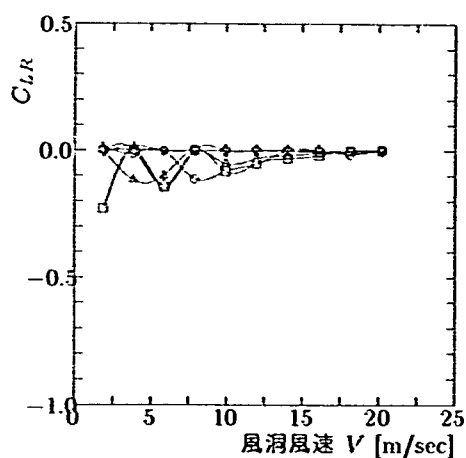


图-4.2.1.14 非定常空气力系数: $S_H = 2D$ 、 $\eta/D = 0.1$

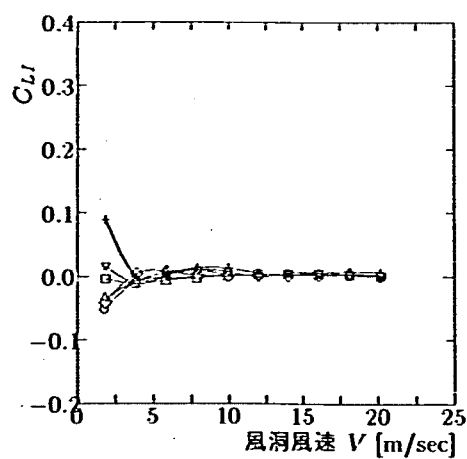
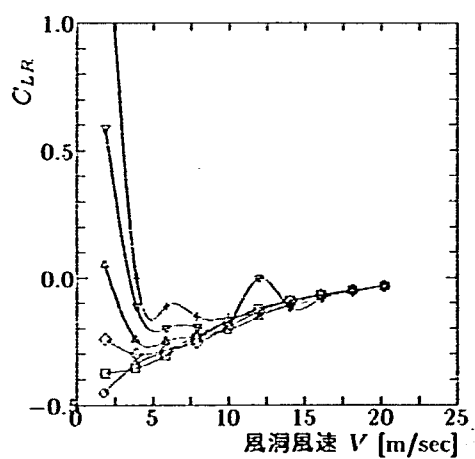


图-4.2.1.15 非定常空气力系数: $S_H = 2D$ 、 $\eta/D = 0.2$

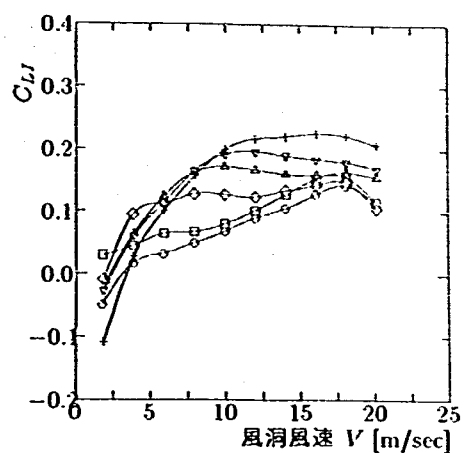
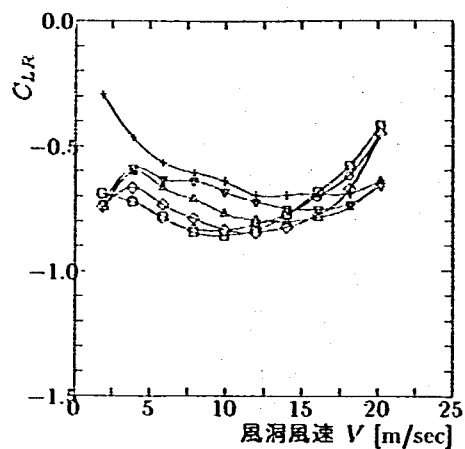


圖-4.2.1.16 非定常空氣力係數： $S_H = 2D$ 、 $\eta/D = 0.3$

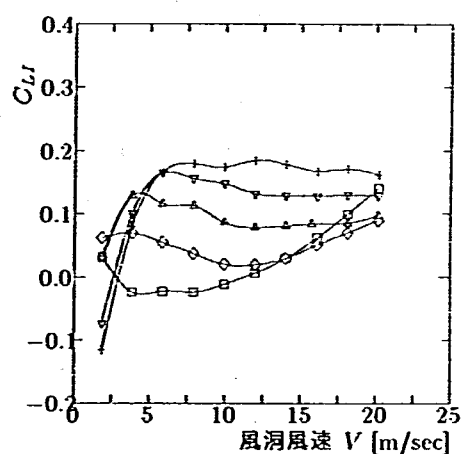
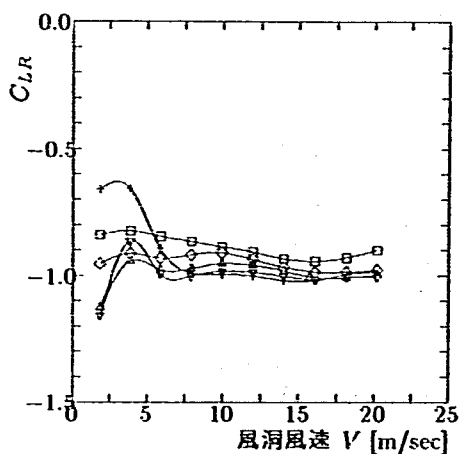


圖-4.2.1.17 非定常空氣力係數： $S_H = 2D$ 、 $\eta/D = 0.4$

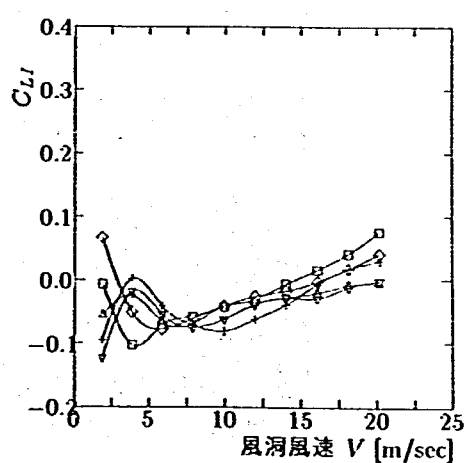
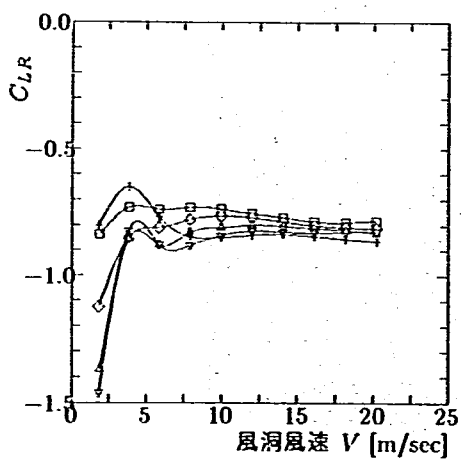


圖-4.2.1.18 非定常空氣力係數： $S_H = 2D$ 、 $\eta/D = 0.5$

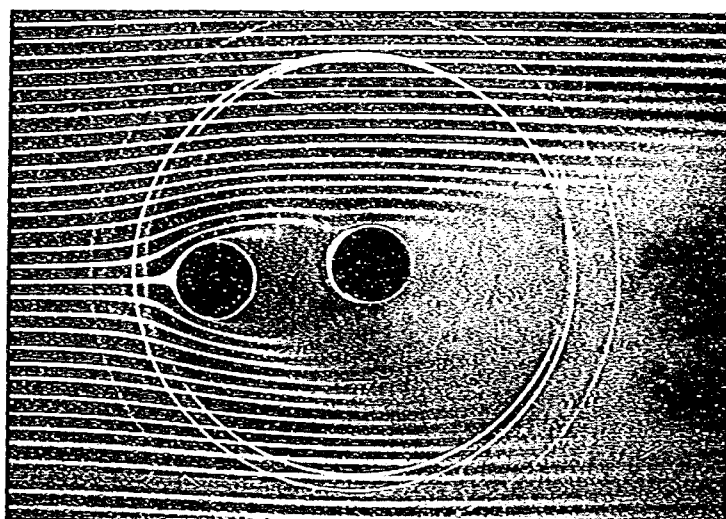


写真-4.2.1.1 並列ケーブル周りのながれ : $S_H = 2D$ 、 $\alpha = -6^\circ$

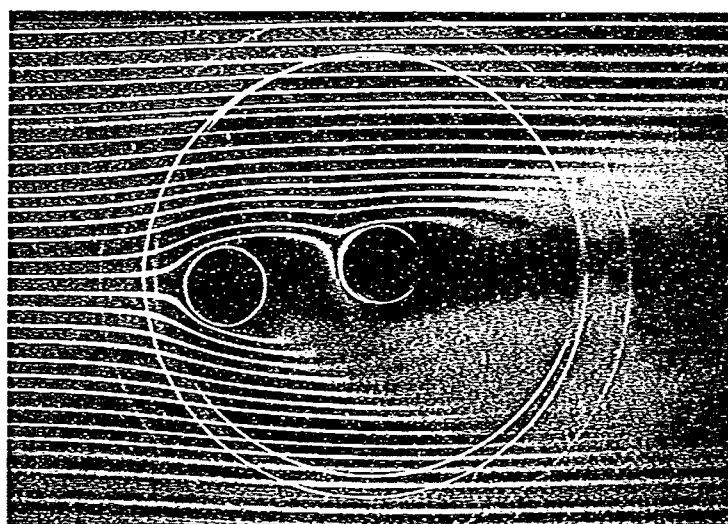


写真-4.2.1.2 並列ケーブル周りのながれ : $S_H = 2D$ 、 $\alpha = -8^\circ$

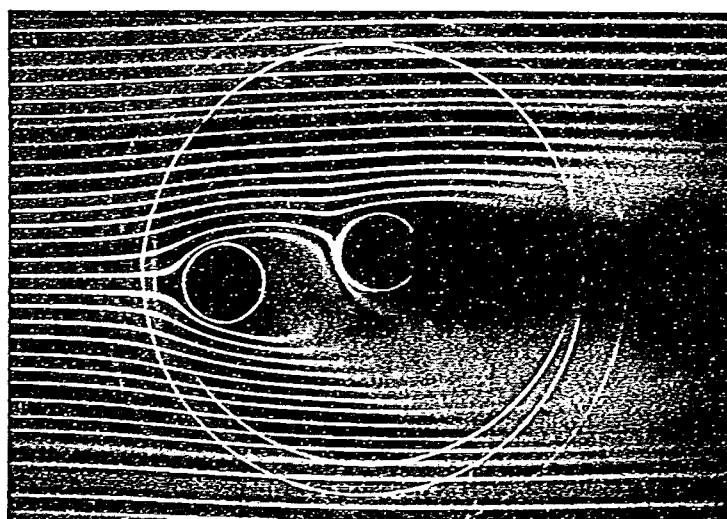


写真-4.2.1.3 並列ケーブル周りのながれ : $S_H = 2D$ 、 $\alpha = -11^\circ$

4.2.2 ケーブル間隔と迎角の影響（その2）

(1) 研究の目的

「ケーブル間隔と迎角の影響（その1）」において、ウェークギャロッピングの発生に関するパラメータのうちケーブル間隔やレイノルズ数と無次元風速の影響、あるいはスクルトン数の影響についての基本的な試験が実施された。（その2）では、振動の自由度が応答特性や発生機構に影響を及ぼすことが予想されることから、ケーブル相互の水平及び垂直間隔と振動の自由度を変化させて応答特性の面からこれらを明らかにすることを目的とした。また、基本的なパラメータとしてレイノルズ数の影響についても（その1）を補完する目的で調査する。

(2) 研究の方法

1) 試験内容

本年度も、振動特性把握のため二次元ばね支持試験を実施した。既往のウェークギャロッピングに関する二次元ばね支持試験では、上流側を固定し、下流側にのみ主流直角方向に1自由度を与えるのが一般的である。しかし、本研究では上流側、下流側双方のケーブルに主流直角方向に1自由度を与えて、その影響を調査した。

2) 風洞施設

試験は、住友重機械工業㈱総合技術研究所のエッフェル風洞を用いて実施した。風洞の測定部の寸法は高さ2m×幅1.5m×長さ15mで、風速範囲は0～20m/sである。表-4.2.2.1に主要諸元を、図-4.2.2.1に概観図を示す。

表-4.2.2.1 風洞装置主要諸元

項 目	エッフェル風洞
形 式	エッフェル型室内還流方式
軸 心 長	32.24m
測 定 部	1.5m(W)×2m(H)×20m(L)
風 速	0.5～20m/s
分 布 偏 差	±1%以下
乱 れ 度	1%以下
フ ァ ン 径	φ2000mm
最 大 回 転 数	1300rpm
電 動 機	55KW DCモータ（プーリーVベルト）
制 御 方 式	サイリスタレオナード方式
計 測 装 置	バネ支持実験装置 静的空気力測定装置 電磁加振減衰装置 データ処理装置

② 実験パラメータ

表-4.2.2.2に、試験対象ケースの実験パラメータを示す。

表-4.2.2.2 試験対象ケース

試験番号		1	2	3	4	5	6
ケーブルタイプ		I-2h	I-2h	I-2h	I-2h	I-2h	I-2h
ケーブル径 D (mm)		50	50	50	50	50	100
ケーブル間隔	Sh/D	2	4	2	3	4	4
	Sv/D	0	0	0	0	0	0
迎角 α (°)		0	0	0	0	0	0
振動数 f (Hz)	上流側	固定	固定	1.14	1.15	1.15	0.57
	下流側	1.14	1.15	1.14	1.14	1.15	0.56
重量 W (kgf/m)	上流側	固定	固定	6.56	5.59	5.59	11.66
	下流側	5.60	5.16	5.60	5.11	5.16	11.69
対数減衰率 δ	上流側	固定	固定	0.00688	0.00826	0.00841	0.01648
	下流側	0.00832	0.00907	0.00832	0.00906	0.00918	0.01628
スループ数 Sc	上流側	固定	固定	29.5	30.2	30.7	31.4
	下流側	30.4	30.6	30.4	30.2	30.6	31.1

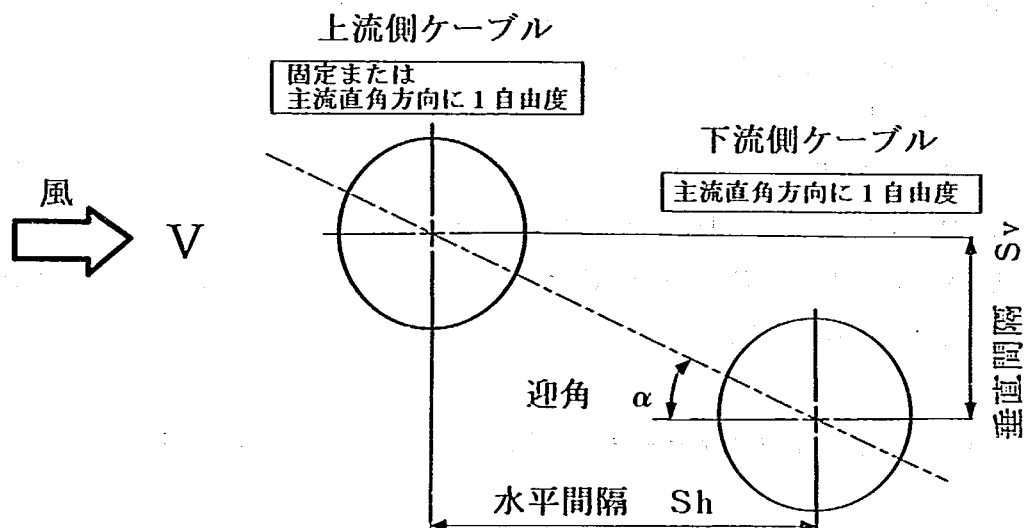


図-4.2.2.2 ケーブル模型の配置

(3) 実験結果と考察

「4.5 空力的制振手法の開発に関する研究」で後述する空力対策模型との関係から、無対策のケーブル模型をノーマルケーブルと称し、ここではノーマルケーブルの試験結果について述べる。

試験結果は、風速と振幅の関係 ($V-A$ 図) と、風速と振幅及び減衰率の関係 ($V-A-\delta$ 図) として整理した。試験対象ケースについての風速と振幅の関係 ($V-A$ 図) を図-4.2.2.9~18に示す。図中の○、△、▽印は、それぞれ平均振幅、最大振幅、最小振幅を示す。

一方、風速と振幅及び減衰率の関係 ($V-A-\delta$ 図) については、代表的な応答を示す試験ケースの下流側ケーブルについて示す。図-4.2.2.19~23に、風速と振幅及び減衰率の関係 ($V-A-\delta$ 図) を示す。

1) ケーブルの自由度の影響

図-4.2.2.3、4に、ケーブル間隔(Sh, Sv)=(20, 0)、(40, 0)について、上流側ケーブルを固定した場合と主流直角方向に1自由度を与えた場合の下流側ケーブルの平均応答振幅を示す。どちらのケースも上流側ケーブルの自由度に依らず、(Sh, Sv)=(20, 0)ではハード型、(Sh, Sv)=(40, 0)ではソフト型の応答を示しており、発振風速もほとんど変化していない。ただし、(Sh, Sv)=(20, 0)では不安定なリミットサイクルが現れる風速域が異なっており、(Sh, Sv)=(40, 0)では風洞風速 $V = 5 \sim 10\text{m/s}$ 付近の応答が異なっている。よって、上流側ケーブルの主流直角方向の1自由度は、下流側ケーブルに対して定性的な影響は与えないと考えられる。このことは、(Sh, Sv)=(20, 0)の $V-A-\delta$ 図 (図-4.2.2.19、20) をからもいえる。

なお、今回の試験対象ケースではノーマルケーブルの場合、上流側ケーブルには不安定振動は発現しなかった。

2) ケーブル間隔の影響

図-4.2.2.5、6に、上流側ケーブルに主流直角方向に1自由度を与えた場合の(Sh, Sv)=(20, 0)、(30, 0)、(40, 0) (ケーブル径 $D=50\text{mm}$) の平均応答振幅を示す。下流側ケーブルは、(Sh, Sv)=(20, 0)、(30, 0)ではハード型の応答、(Sh, Sv)=(40, 0)ではソフト型の応答を示している。

3) ケーブル径の影響

図-4.2.2.7、8に、(Sh, Sv)=(40, 0)におけるケーブル径 $D=50, 100\text{mm}$ の平均応答振幅の比較を示す。 $D=50\text{mm}$ ではソフト型の応答、 $D=100\text{mm}$ ではハード型の応答を示す。これは、レイノルズ数の影響だと考えられる。前年度の報告書⁹⁾にも指摘されているように、ウェークギャロッピングはレイノルズ数の変化に敏感であるといえる。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所他；斜張橋並列ケーブルの耐風制振に関する共同研究報告書（その2）、平成6年3月

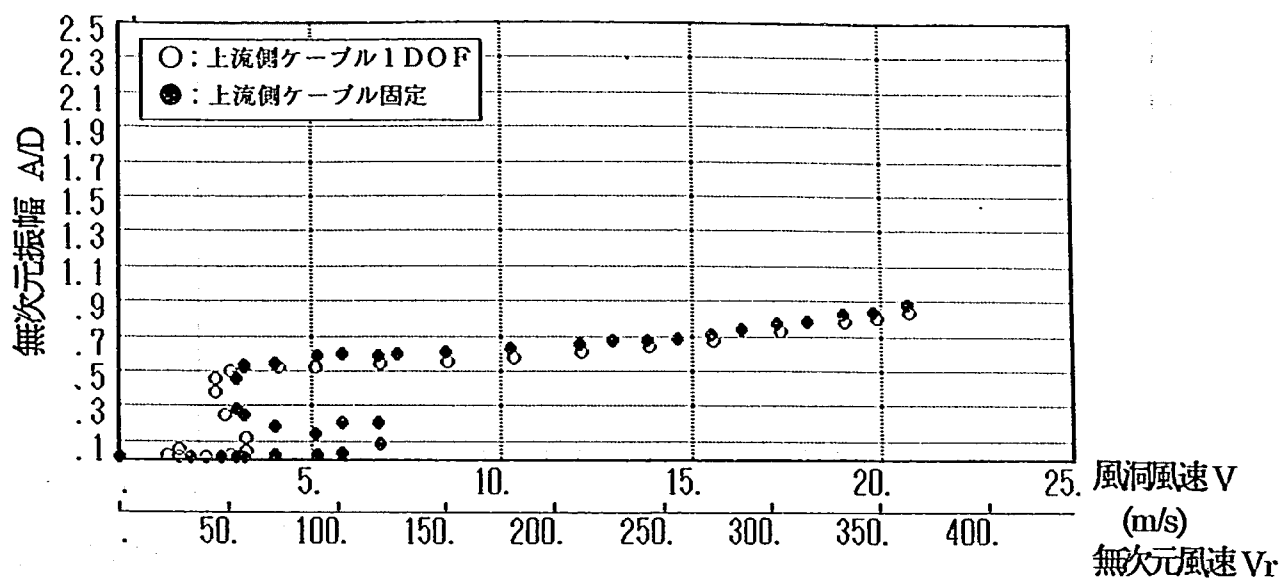


図-4.2.2.3 上流側ケーブルの自由度による下流側ケーブルの応答の比較
(ノーマル、 $D=50\text{mm}$ 、 $(Sh, Sv)=(20, 0)$)

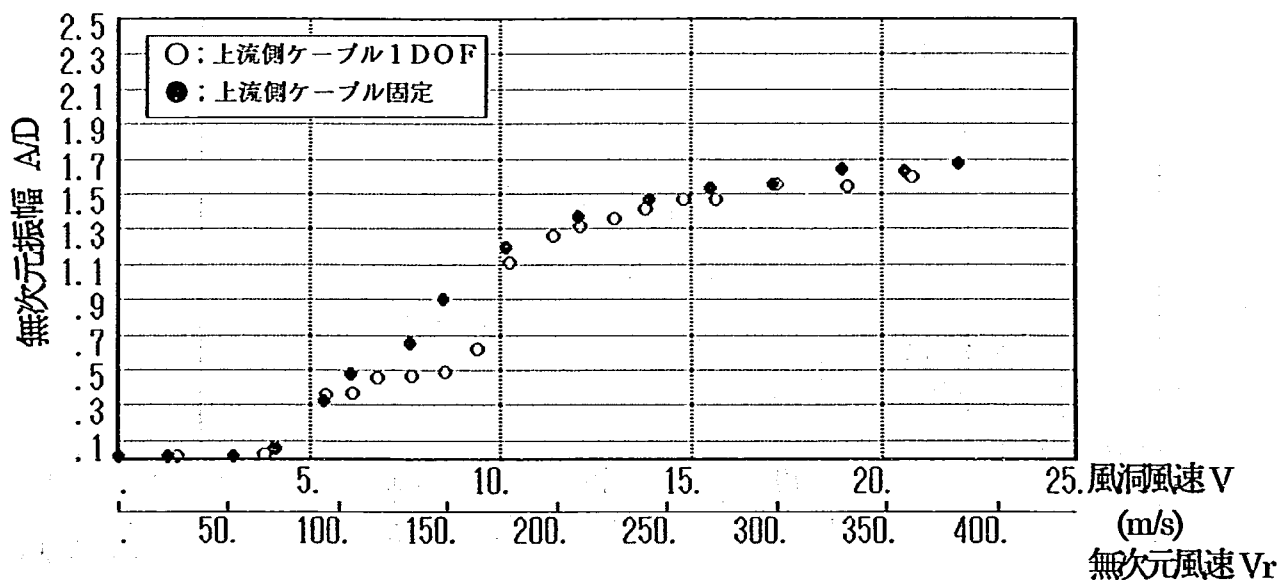


図-4.2.2.4 上流側ケーブルの自由度による下流側ケーブルの応答の比較
(ノーマル、 $D=50\text{mm}$ 、 $(Sh, Sv)=(40, 0)$)

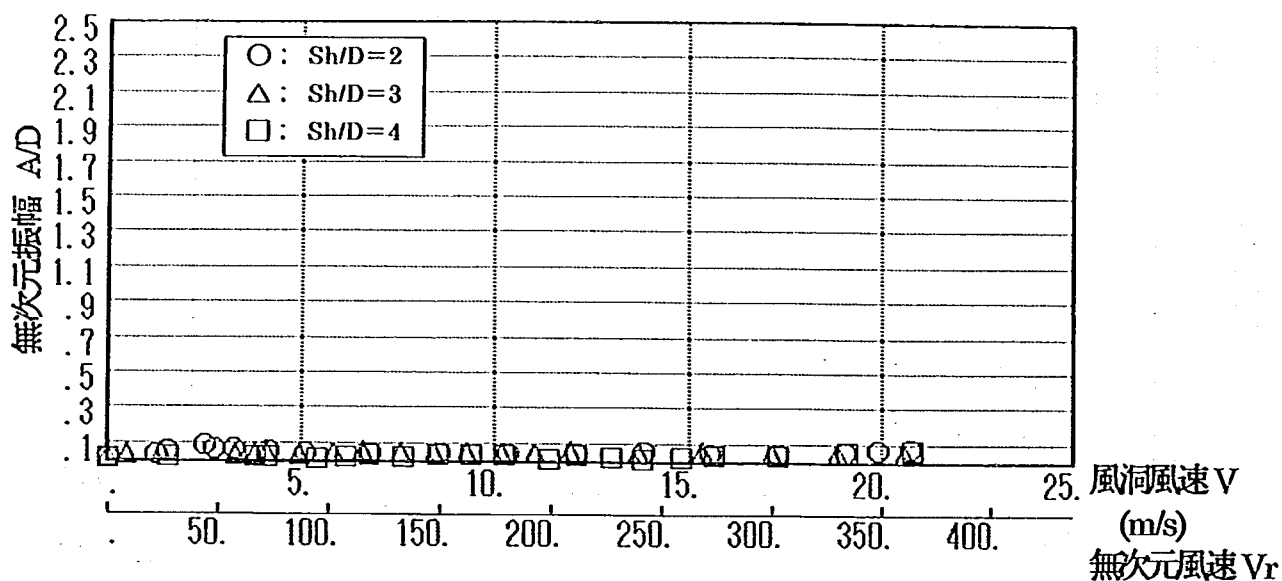


図-4.2.2.5 ケーブル間隔による上流側ケーブルの応答の比較
(ノーマル、 $D=50\text{mm}$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

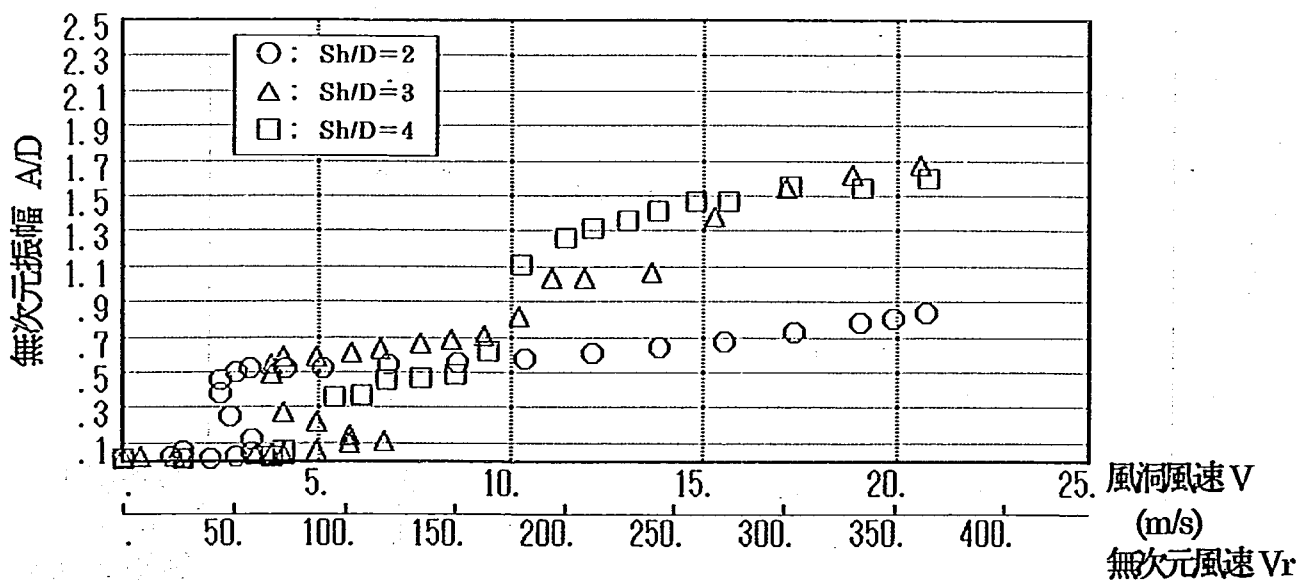


図-4.2.2.6 ケーブル間隔による下流側ケーブルの応答の比較
(ノーマル、 $D=50\text{mm}$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

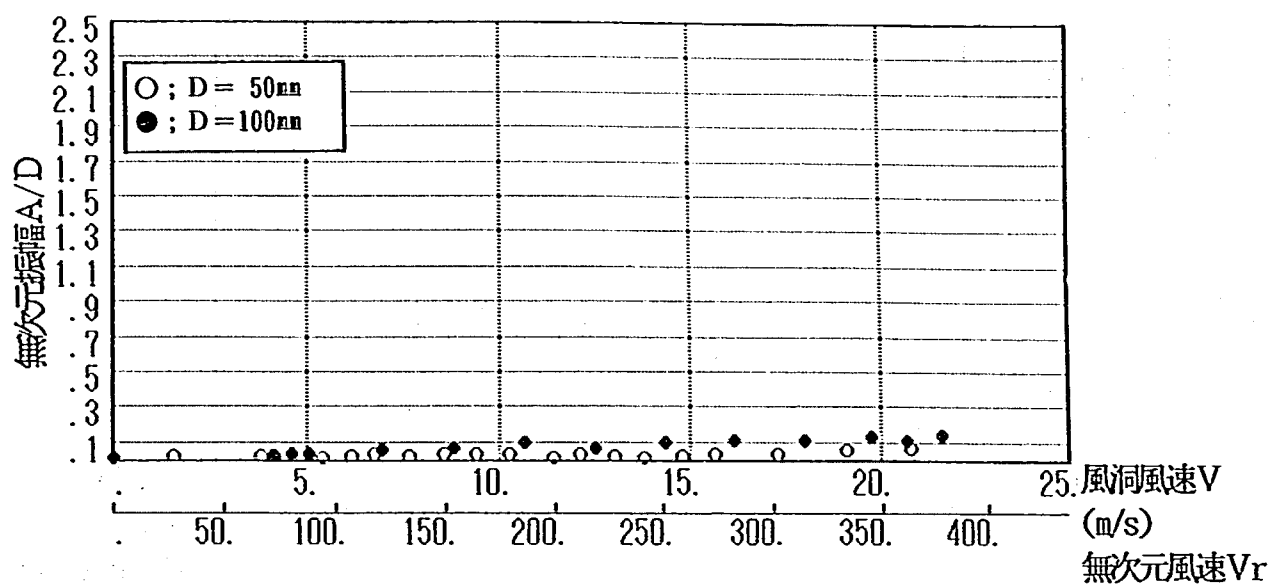


図-4.2.2.7 ケーブル径による上流側ケーブルの応答の比較

(ノーマル、 $(Sh, Sv) = (40, 0)$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

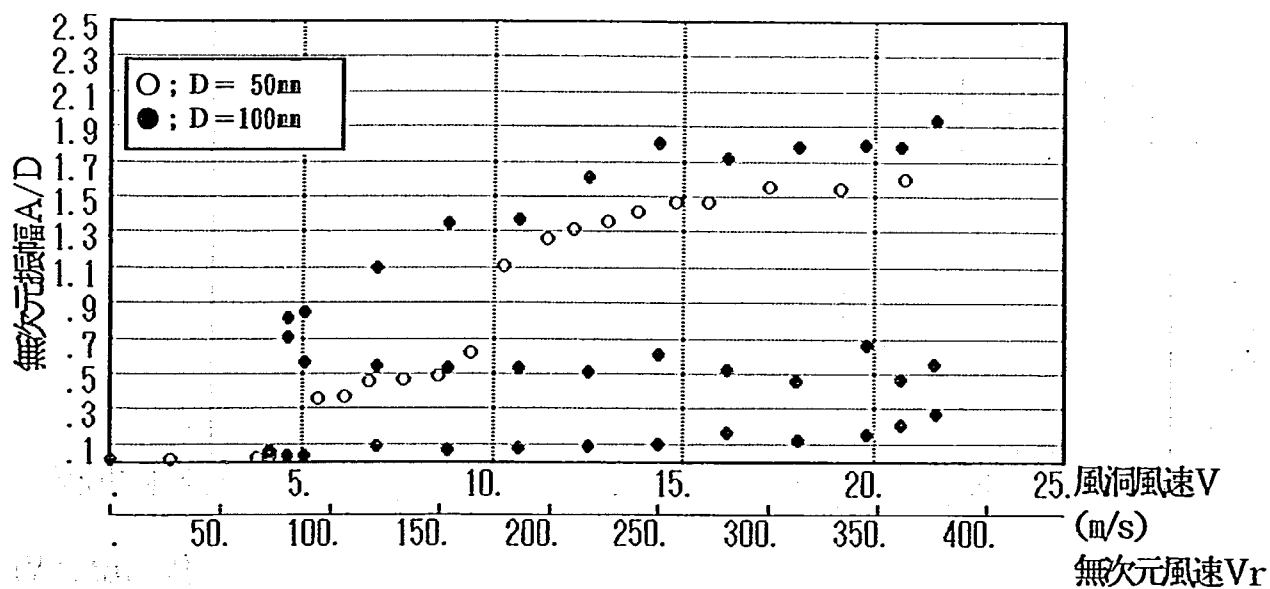


図-4.2.2.8 ケーブル径による下流側ケーブル応答の比較

(ノーマル、 $(Sh, Sv) = (40, 0)$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

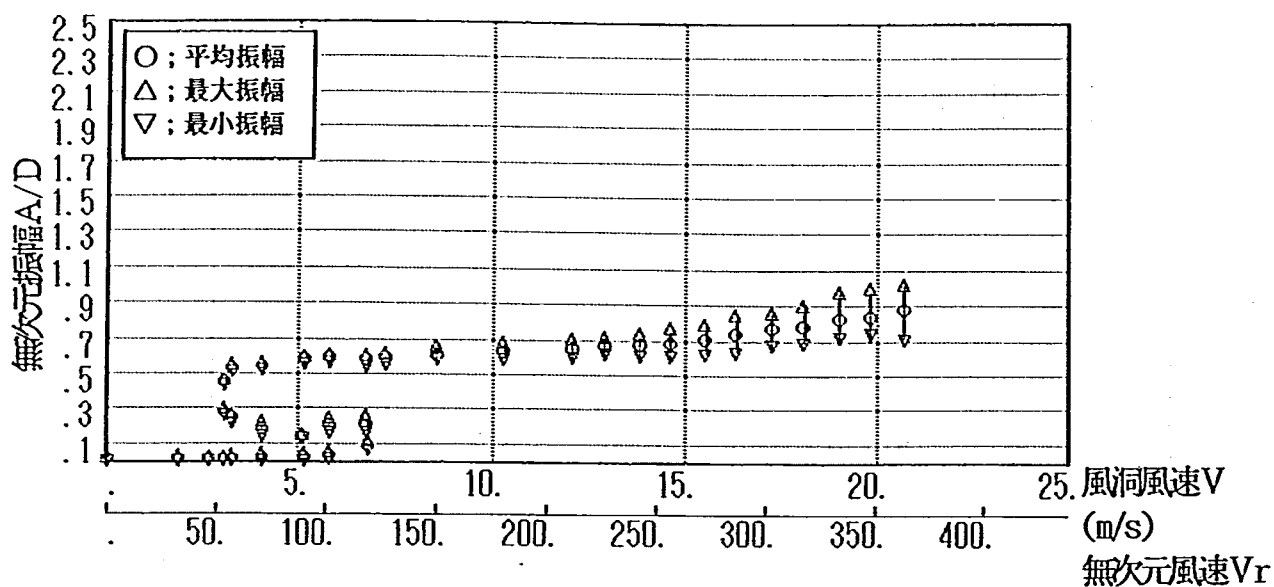


図-4.2.2.9 $(Sh, Sv) = (20, 0)$ での下流側ケーブルの風速と振幅の関係；試験番号 1
(ノーマル、 $D=50\text{mm}$ 、上流側；固定、下流側；1自由度)

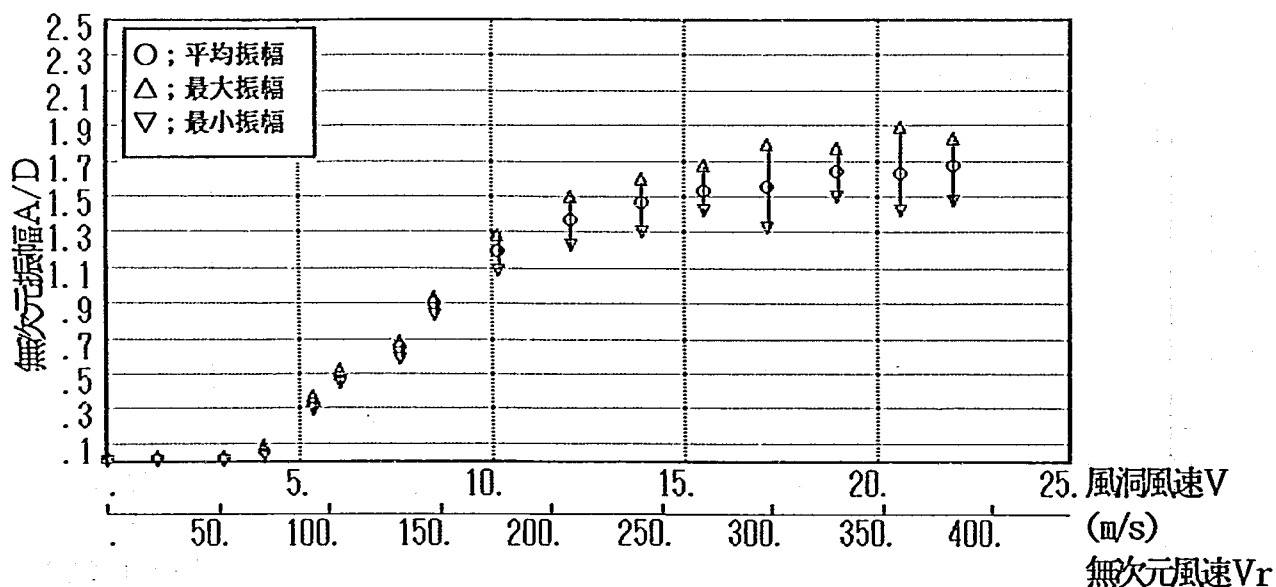


図-4.2.2.10 $(Sh, Sv) = (40, 0)$ での下流側ケーブルの風速と振幅の関係；試験番号 2
(ノーマル、 $D=50\text{mm}$ 、上流側；固定、下流側；1自由度)

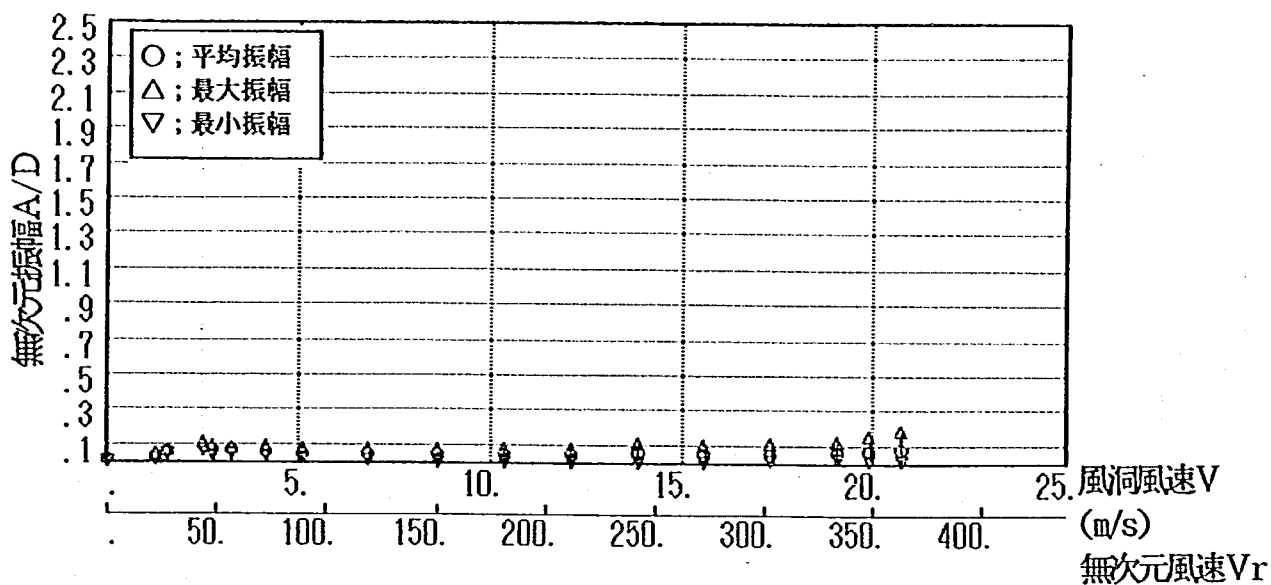


図-4.2.2.11 $(Sh, Sv) = (20, 0)$ での上流側ケーブルの風速と振幅の関係；試験番号 3
(ノーマル、 $D=50\text{mm}$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

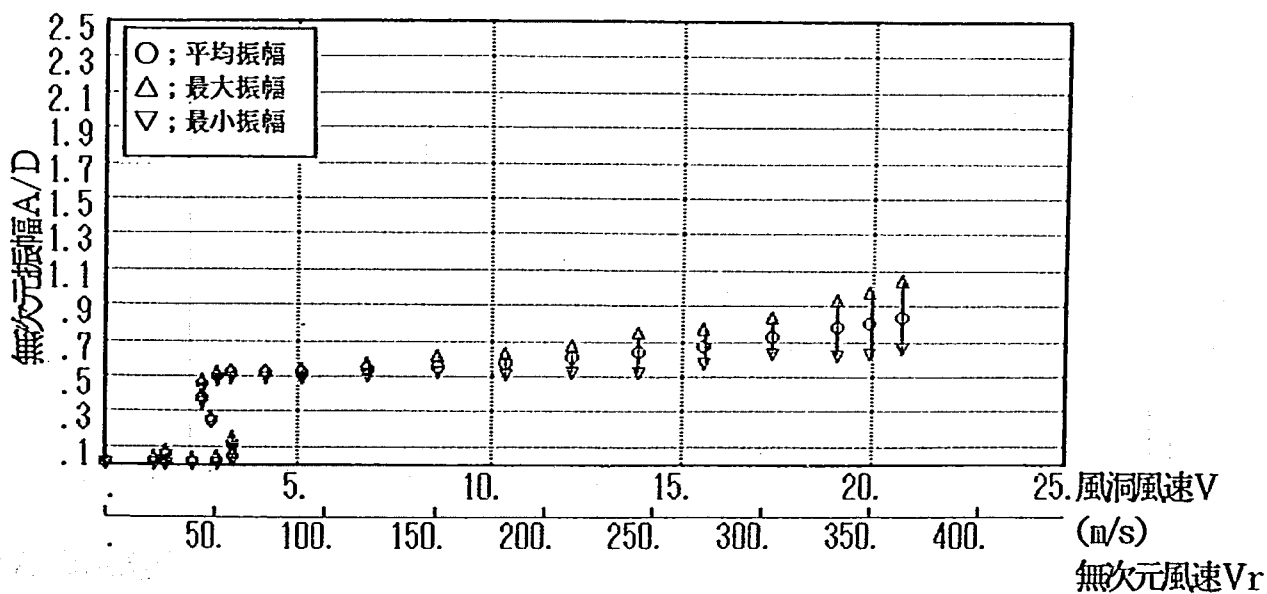


図-4.2.2.12 $(Sh, Sv) = (20, 0)$ での下流側ケーブルの風速と振幅の関係；試験番号 3
(ノーマル、 $D=50\text{mm}$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

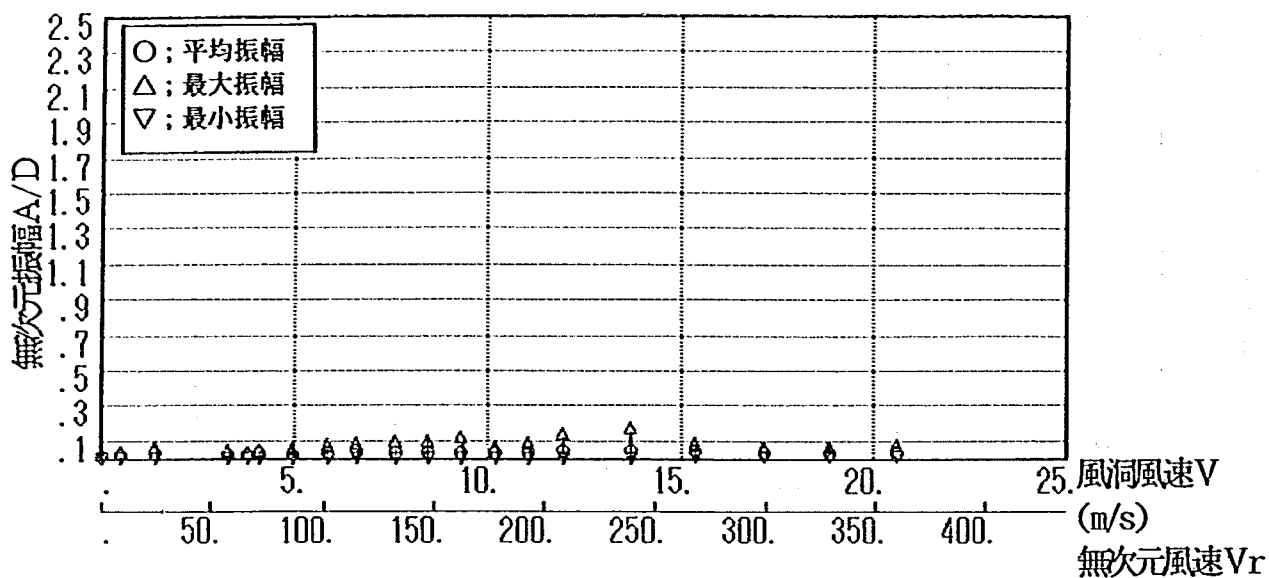


図-4.2.2.13 $(Sh, Sv) = (3D, 0)$ での上流側ケーブルの風速と振幅の関係；試験番号 4
(ノーマル、 $D=50\text{mm}$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

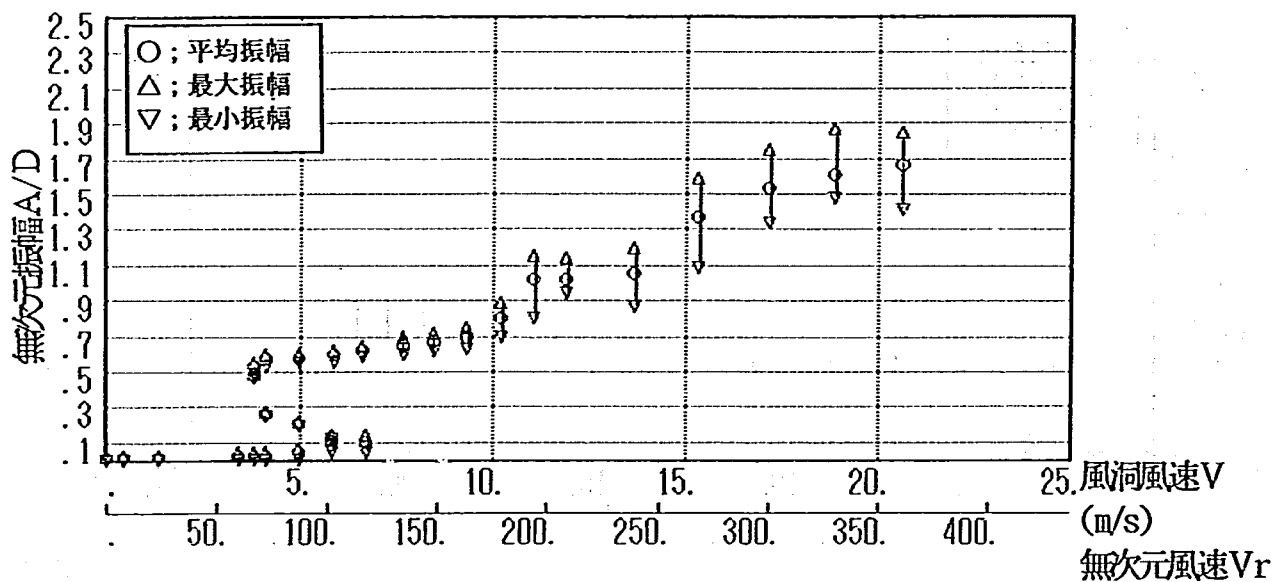


図-4.2.2.14 $(Sh, Sv) = (3D, 0)$ での下流側ケーブルの風速と振幅の関係；試験番号 4
(ノーマル、 $D=50\text{mm}$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

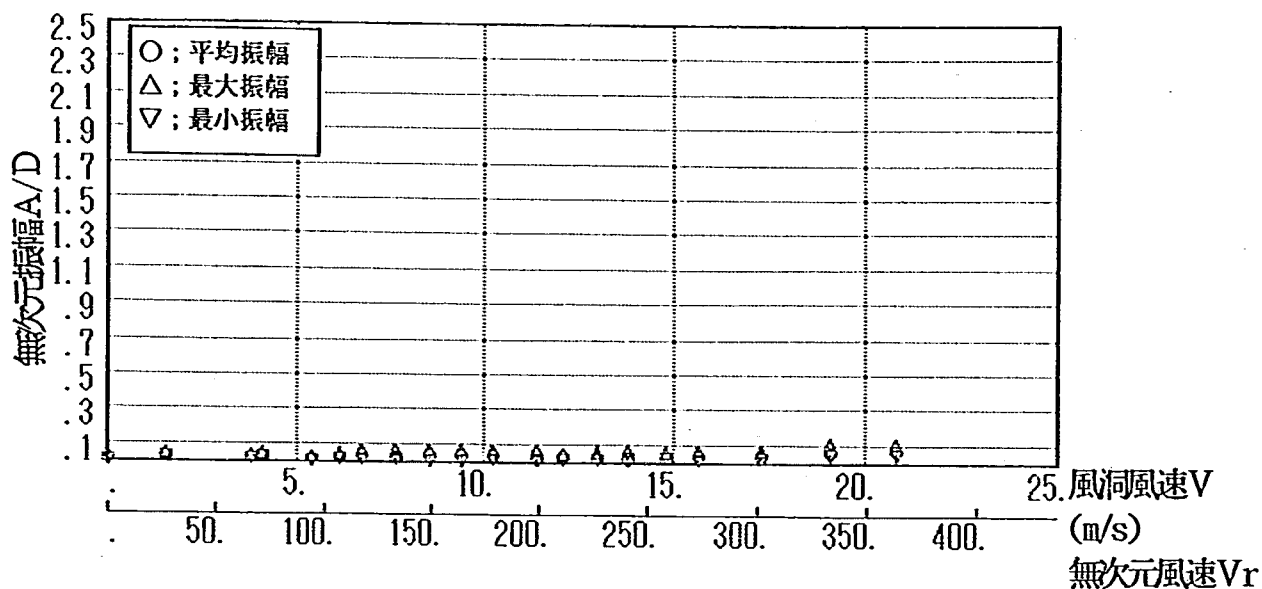


図-4.2.2.15 $(Sh, Sv) = (40, 0)$ での上流側ケーブルの風速と振幅の関係; 試験番号 5
(ノーマル、 $D=50\text{mm}$ 、上流側; 1自由度、下流側; 1自由度)

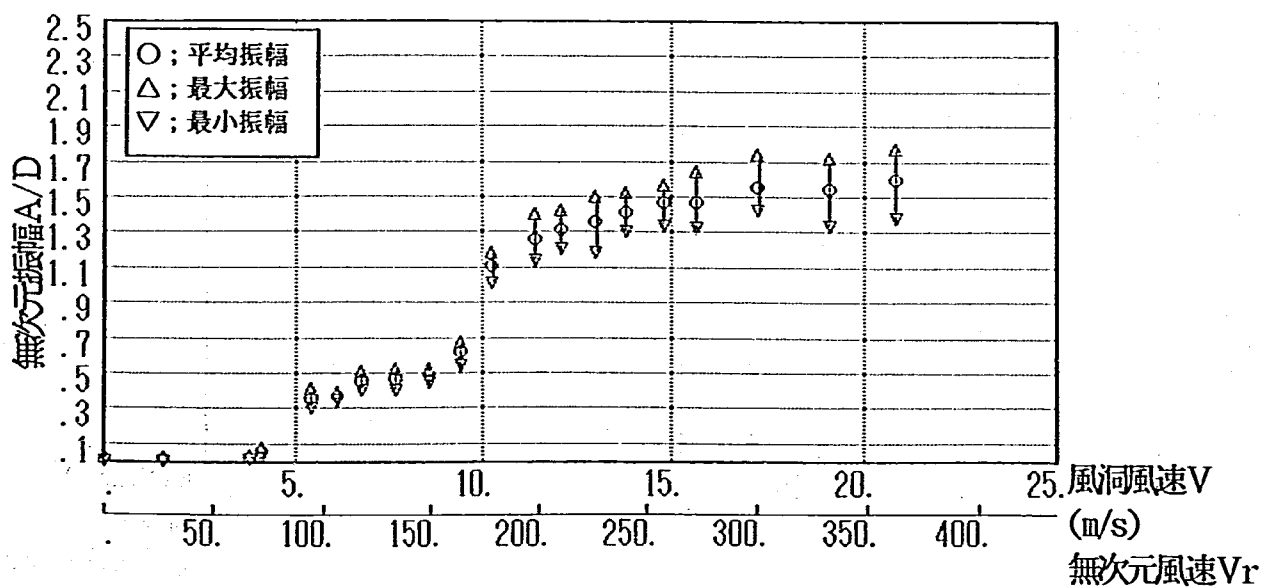


図-4.2.2.16 $(Sh, Sv) = (40, 0)$ での下流側ケーブルの風速と振幅の関係; 試験番号 5
(ノーマル、 $D=50\text{mm}$ 、上流側; 1自由度、下流側; 1自由度)

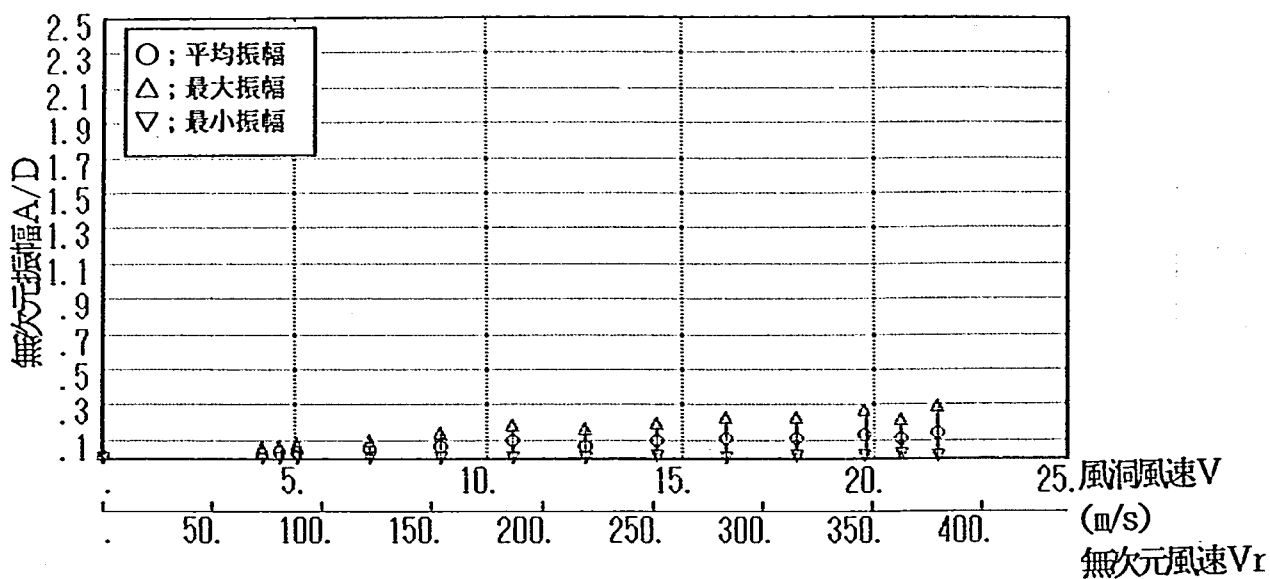


図-4.2.2.17 $(Sh, Sv) = (40, 0)$ での上流側ケーブルの風速と振幅の関係；試験番号 6

(ノーマル、 $D=100\text{mm}$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

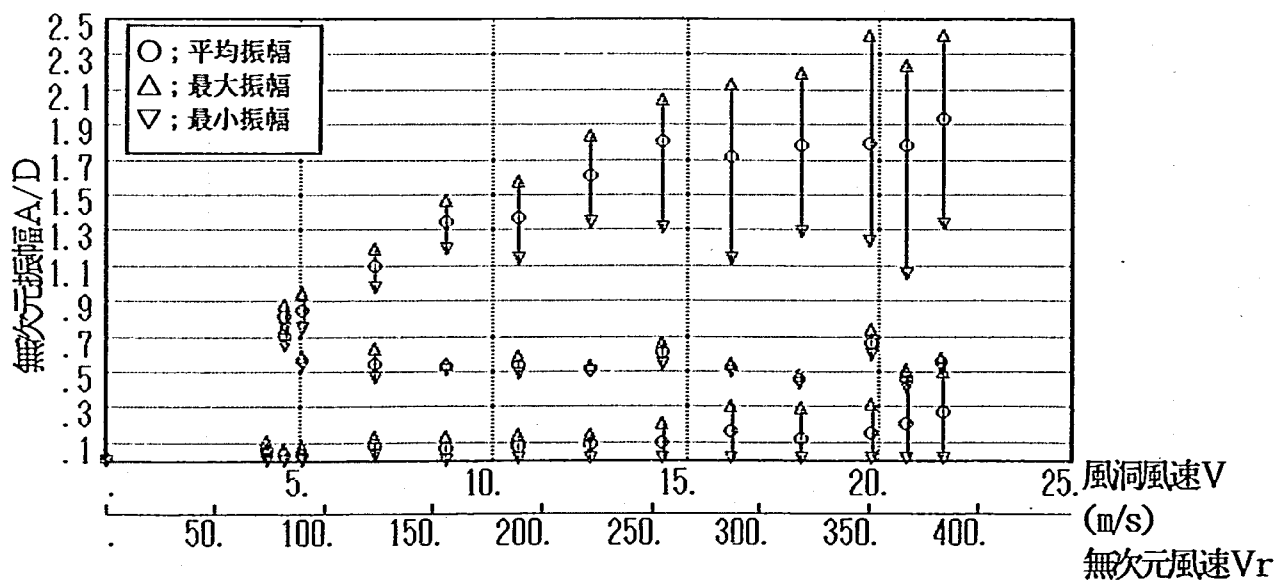


図-4.2.2.18 $(Sh, Sv) = (40, 0)$ での下流側ケーブルの風速と振幅の関係；試験番号 6

(ノーマル、 $D=100\text{mm}$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

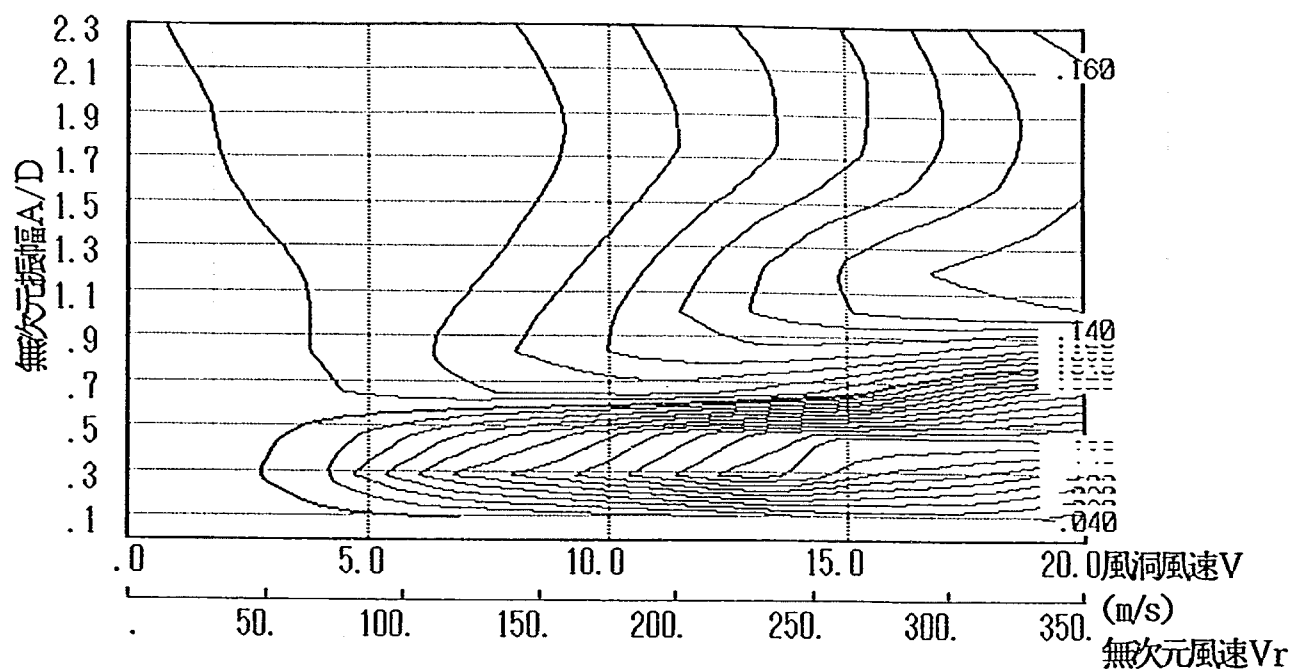


図-4.2.2.19 $(Sh, Sv) = (20, 0)$ での下流側ケーブルの風速と振幅および減衰率の関係；試験番号 1
(ノーマル、 $D=50\text{mm}$ 、上流側；固定、下流側；1自由度)

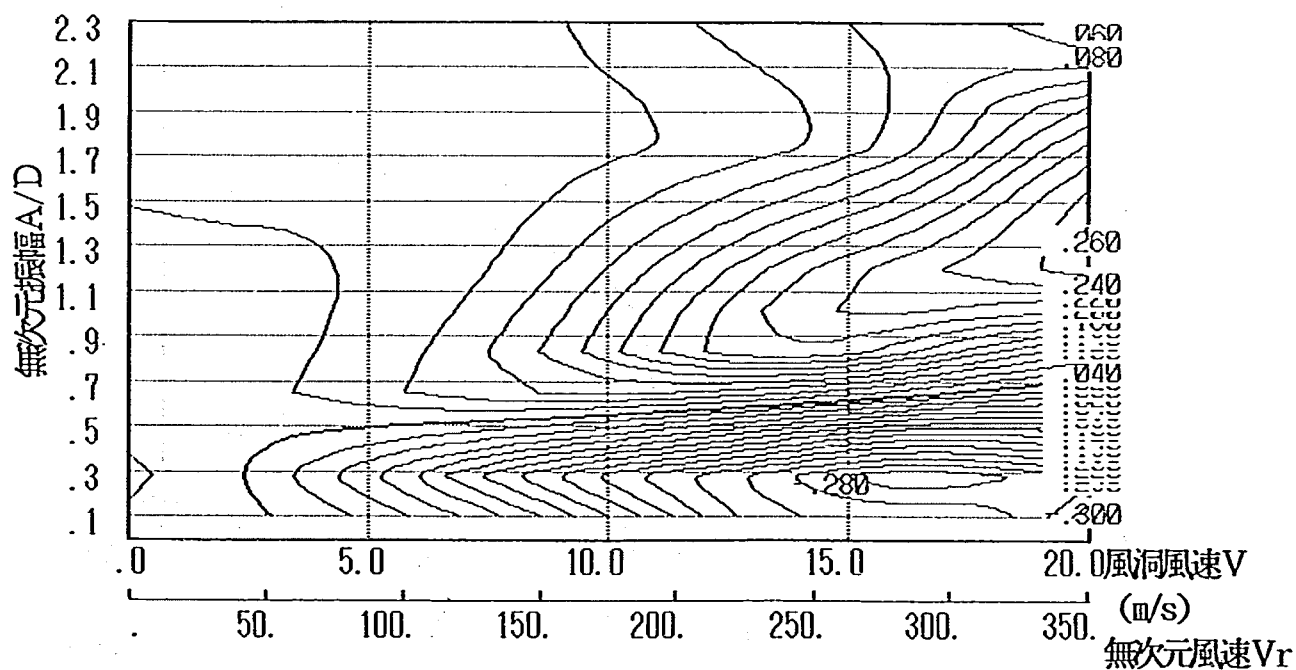


図-4.2.2.20 $(Sh, Sv) = (20, 0)$ での下流側ケーブルの風速と振幅および減衰率の関係；試験番号 3
(ノーマル、 $D=50\text{mm}$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

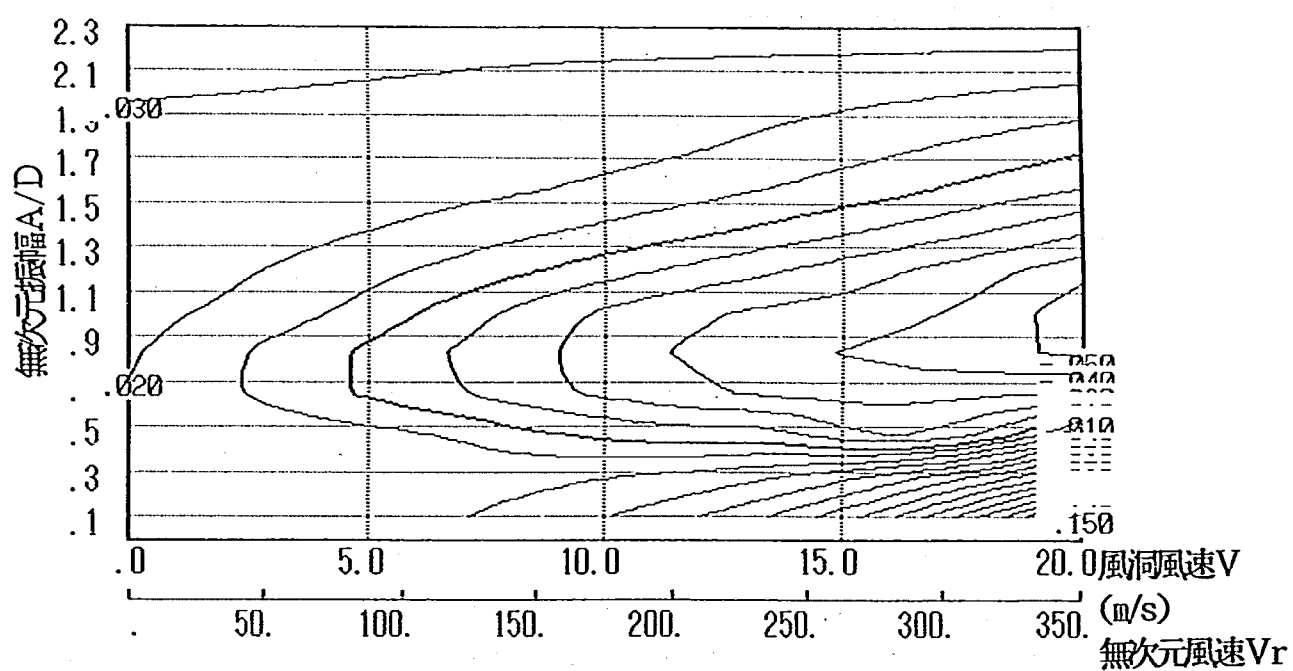


図-4.2.2.23 $(Sh, Sv) = (40, 0)$ での下流側ケーブルの風速と振幅と減衰率の関係；試験番号6
(ノーマル、 $D=100\text{mm}$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

4.2.3 振動の自由度および気流特性の影響

(1) 平成5年度の成果と平成6年度の実験の概要

昨年度は、タウトストリップ模型を用い、ケーブル間隔、気流乱れ強度およびケーブルの振動数をパラメータにしてウェークギャロッピングの応答を観測した。得られた主要な結論は次の通りである。

- 1) ケーブル間隔の増加は、ウェークギャロッピングを安定化する傾向にある。
- 2) 乱れ強度の増加は、ウェークギャロッピングを安定化する傾向にある。
- 3) ケーブル間隔増加だけでウェークギャロッピングに対処する方法は、乱れ強度が小さい場合は現実的ではないが、大きな乱れ強度が期待できる場合には、検討に値する。
- 4) 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。
- 5) ウェークギャロッピングの発生には、上下流ケーブルが逆相で振動することは必要条件ではない。
また、上下流ケーブルの他の原因による振動とウェークギャロッピングの空力的干渉もほとんどなく、ウェークギャロッピングの不安定性は極めて独立性の高いものである。

上記の結論の中、特に④⑤は、ウェークギャロッピングが他の空力振動と著しく異なった特徴を持つ現象であることを示しており、振動発生メカニズムを探る上で、重要な手がかりと考えられる。

これを踏まえ、本年度は、並列円柱に作用する定常空気力、および非定常圧力の計測を行ない、その結果に基づいて振動発生メカニズムについて若干の考察を行なった。

(2) 供試模型と実験方法

1) 模型の諸元

外径151mm、長さ1600mmの亚克力製パイプを用いた2次元剛体模型を用いた。模型端部には直径250mmのジュラルミン製円形端板を設けた。2次隔壁は使用していない。

2) 定常空気力の測定

2円柱の中心間隔が2D、4D、6D、8D（Dは模型の外径）の場合について、両円柱の鉛直方向の相対位置を-4Dから+4Dまで変化させ、下流側円柱に作用する揚力を計測した。

両円柱は、図-4.2.3.1に示すように、ピアノ線で風洞の天井および床に固定し、上流側の円柱の高さを順次変えながら、下流側円柱を支持するピアノ線の支点に挿入したロードセルで揚力を計測した。

測定風速は10および20m/sの2風速、使用気流は一様流である。結果は、一般的な揚力係数 C_L の形で整理した。

$$C_L = L / (\rho U^2 A / 2)$$

ただし、Lは揚力、Uは風速、Aは円柱の投影面積、 ρ は空気密度である。

3) 非定常圧力の測定

ウェークギャロッピングが発生して定常的に振動している状態で、下流側円柱の表面圧力を計測した。

この実験では、上流側円柱は固定し、下流側円柱のみをバネで支持してウェークギャロッピングを発生させた。計測時の円柱中心間隔は6D、風速は5m/s、迎え角は0°、使用気流は一様流である。なお、計測時の振動振幅は約0.7Dであった。

圧力計測タップは、下流側円柱の上流端から85°（中心の真上から上流側に5°）の位置に設け、こ

のタップの圧力変動と下流側円柱の振動変位を同時に計測した。

(3) 実験結果

1) 定常空気力

図-4.2.3.2～5に測定結果を示す。図の縦軸は円柱直径で無次元化した両円柱の鉛直距離 Y/D 、横軸は揚力係数 C_L である。また、 Y は下流側円柱が上流側円柱より上にある時を正、 C_L は上向きを正とした。下流側円柱の揚力曲線の特徴は次のようにまとめられる。

- ① 下流側円柱が上流側円柱の後流の中央付近にある時の揚力は小さい。
- ② 下流側円柱が後流中央から上または下方に変位すると揚力の絶対値が急増し、ある位置で最大値をとる。
- ③ それより外側に変位すると揚力の絶対値は滑らかに減少し、0に漸近する。

円柱間隔が小さいほど、揚力が最大となる位置は後流中心に近く、揚力ピークの形はシャープとなる。いずれの場合も、 Y が小さい領域での若干の例外を除けば、 Y と C_L は逆符号であるから、揚力は復原力として作用しており、静的には安定である。なお、2円柱をひとつの物体とみなせば、 Y の変化は迎角の変化とも考えられ、その意味では揚力の負勾配が生じている。しかしながら、下流側円柱だけが鉛直方向に速度を持っている状態は、必ずしも気流が傾斜している状態と等価とは言えず、これに準定常理論を適用してウェークギャロッピングの安定性を論じることの妥当性には疑問がある。

揚力にピークを生じる原因は、ギャップフローによると考えられる。図-4.2.3.6に模式的に示したように、下流側円柱が後流中央から上方に移動している状態を考える。変位が小さい範囲では下流側円柱の上側を流れている外縁流が、下流側円柱の変位の増加とともに下側にスイッチし、この加速された流れによる負圧が大きな下向き揚力を発生させるものであろう。

2) 非定常圧力

圧力測定波形の例を図-4.2.3.7に示す。圧力波形には、かなり不規則な変動も認められるが、一見して、振動周期と同じ周期の変動に加えて周期が半分の成分の存在が明らかである。平均的な特性を調べるために、1周期を16等分して各位置における圧力の平均値を求めたものが図-4.2.3.8である。図から、変位 Y が最大となる位置と最小となる位置の2箇所で圧力の低下が認められる。図-4.2.3.6を参照すれば、前者は円柱の外を流れる外縁流、後者はスイッチされたギャップフローによる圧力低下と理解される。なお、この測定結果では外縁流による圧力低下の方が大きいから、 Y が正の時には負の揚力が作用することになり、図-4.2.3.2～5と相反する。既往文献によれば、ギャップフローによる圧力低下域は上流側に偏っているので、今回のタップの位置では、圧力低下を十分に捉えられなかったものと思われる。図-4.2.3.8からも、非定常圧力の変動は振動変位に対して位相差を持っていることが窺われるが、これを明確にするために、振動変位と圧力変動のリサージュ図形を図-4.2.3.9に示す。なお、圧力タップが円柱の上側にあることから圧力と揚力は逆符号となることを考慮して、図-4.2.3.9では圧力の符号を反転してある。図中に矢印で示したようにリサージュは時計周りとなり、圧力が円柱に対して正の仕事をしていること、すなわち非定常圧力が自励的に作用していることが明らかである。リサージュが囲む面積は図-4.2.3.9の左下の部分で大きい。この部分は図-4.2.3.8では位相角が 180° から 360° の領域に対応し

している。すなわち、下流側円柱の変位に伴い外縁流がギャップフローにスイッチするタイミングが、振動状態では準定常状態よりも遅れることが、ギャロッピングの発生に大きく係わっているものと結論されよう。また、このことは、ギャップフローへのスイッチが起こる振幅に至らなければ自励作用はあまり大きくならないことを示唆するものであり、不安定なリミットサイクルの存在と整合する結果と言える。

(4) 結論

本実験の結果によれば、ウェークギャロッピングの発生には、外縁流がギャップフローにスイッチするタイミングの遅れが大きく関わっているように思われる。しかしながら、このような流れの遅れが不安定性の原因であれば、一般の空力振動と同様に、振動発生風速は無次元風速に依存すると考えるのが自然であり、その意味では、昨年度の実験結果を説明できない部分が残されている。したがって、発生振幅の予測を含め、ウェークギャロッピングのメカニズム解明には、更に研究が必要と言わざるを得ない。

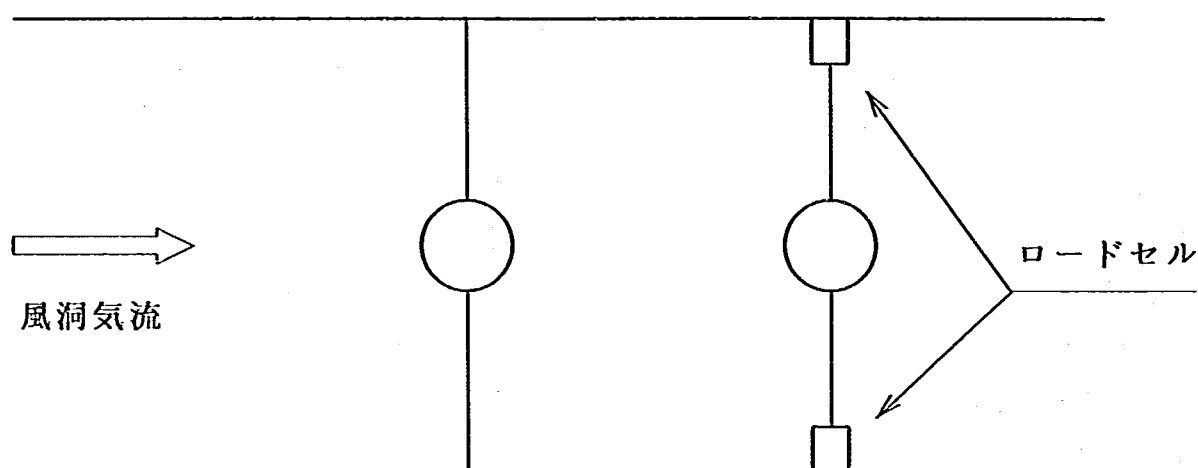


図-4.2.3.1 揚力の測定方法

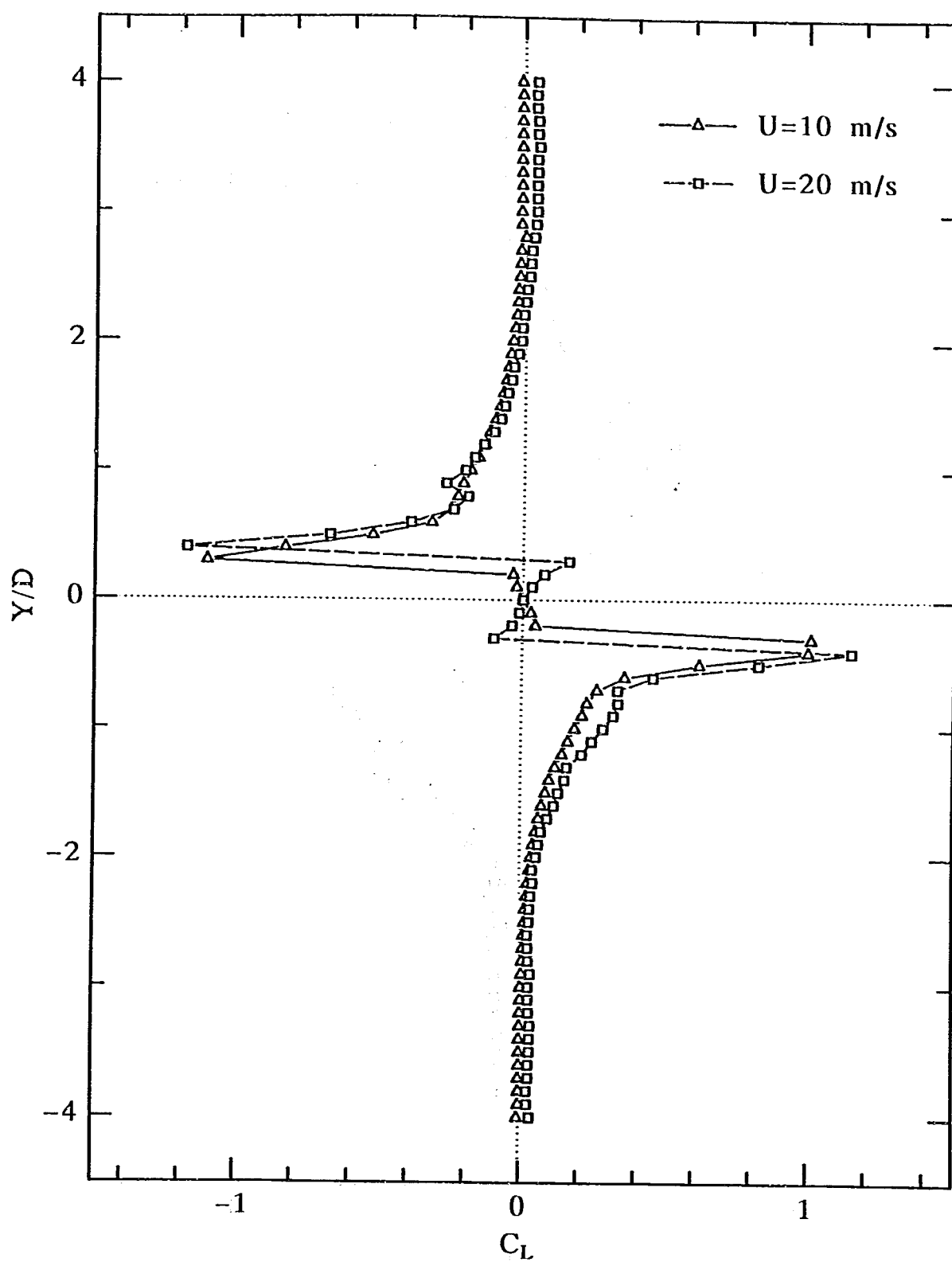


図-4.2.3.2 下流側ケーブルの揚力係数 (中心間隔 $2D$)

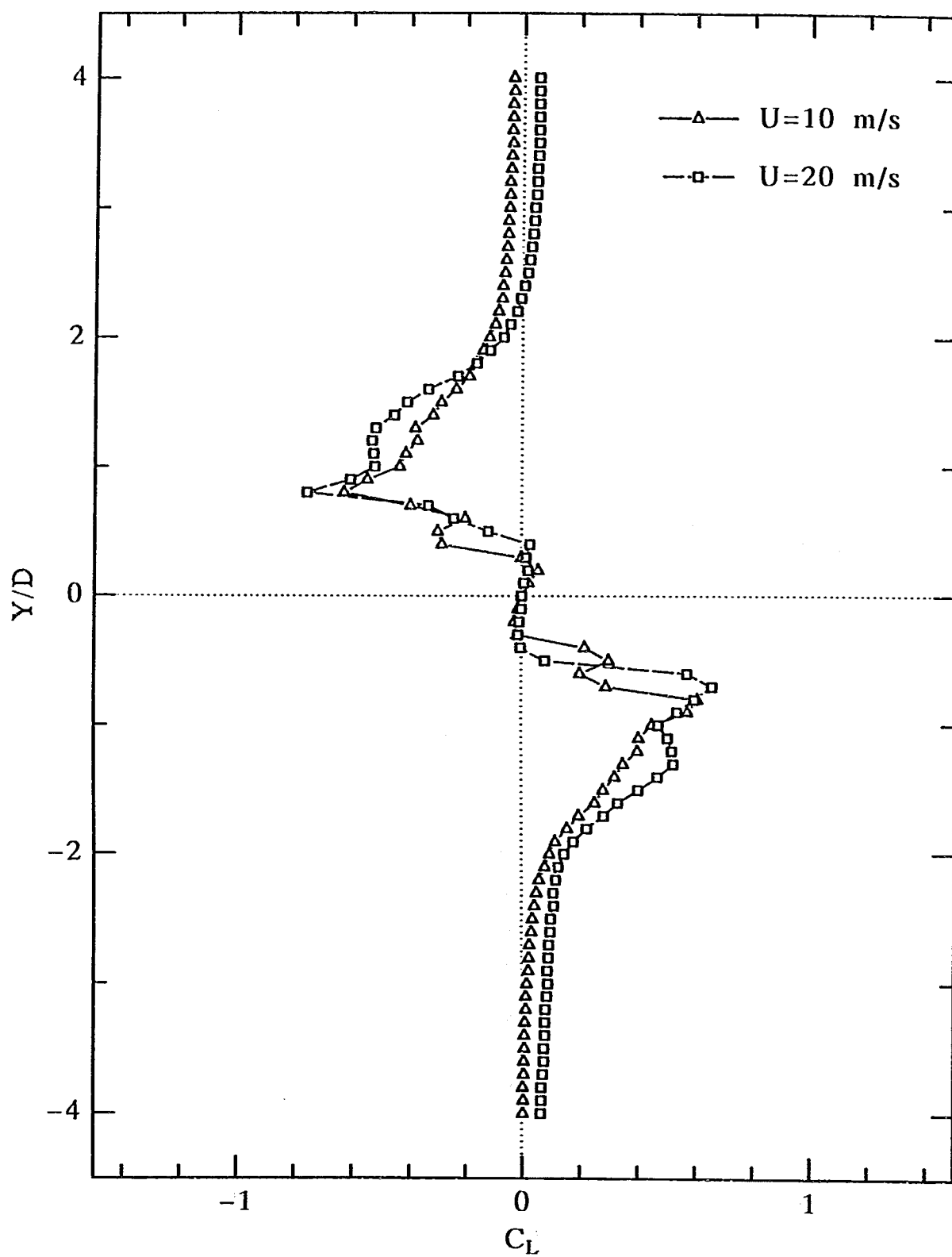


図-4.2.3.3 下流側ケーブルの揚力係数 (中心間隔 $4D$)

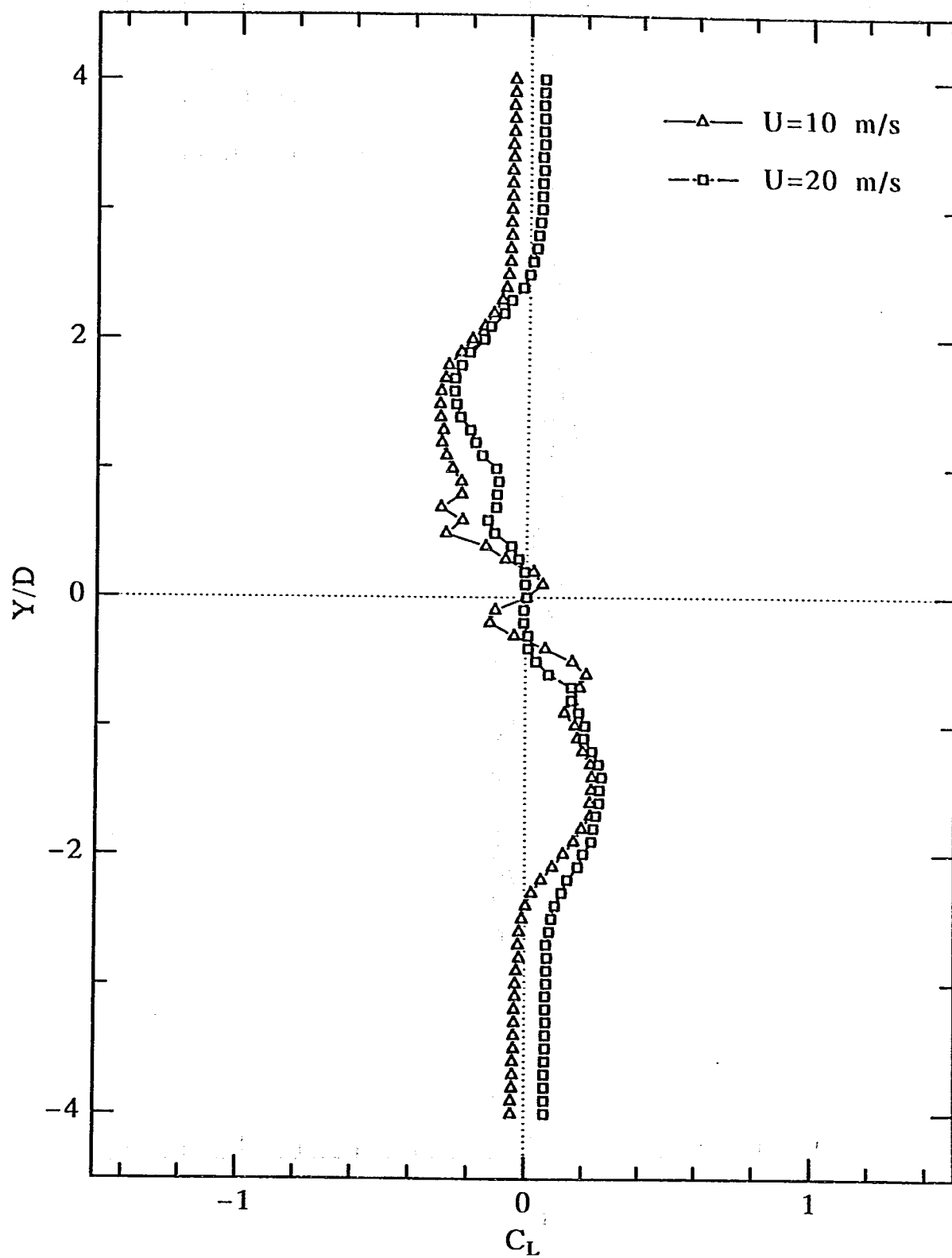


図-4.2.3.4 下流側ケーブルの揚力係数 (中心間隔 6 D)

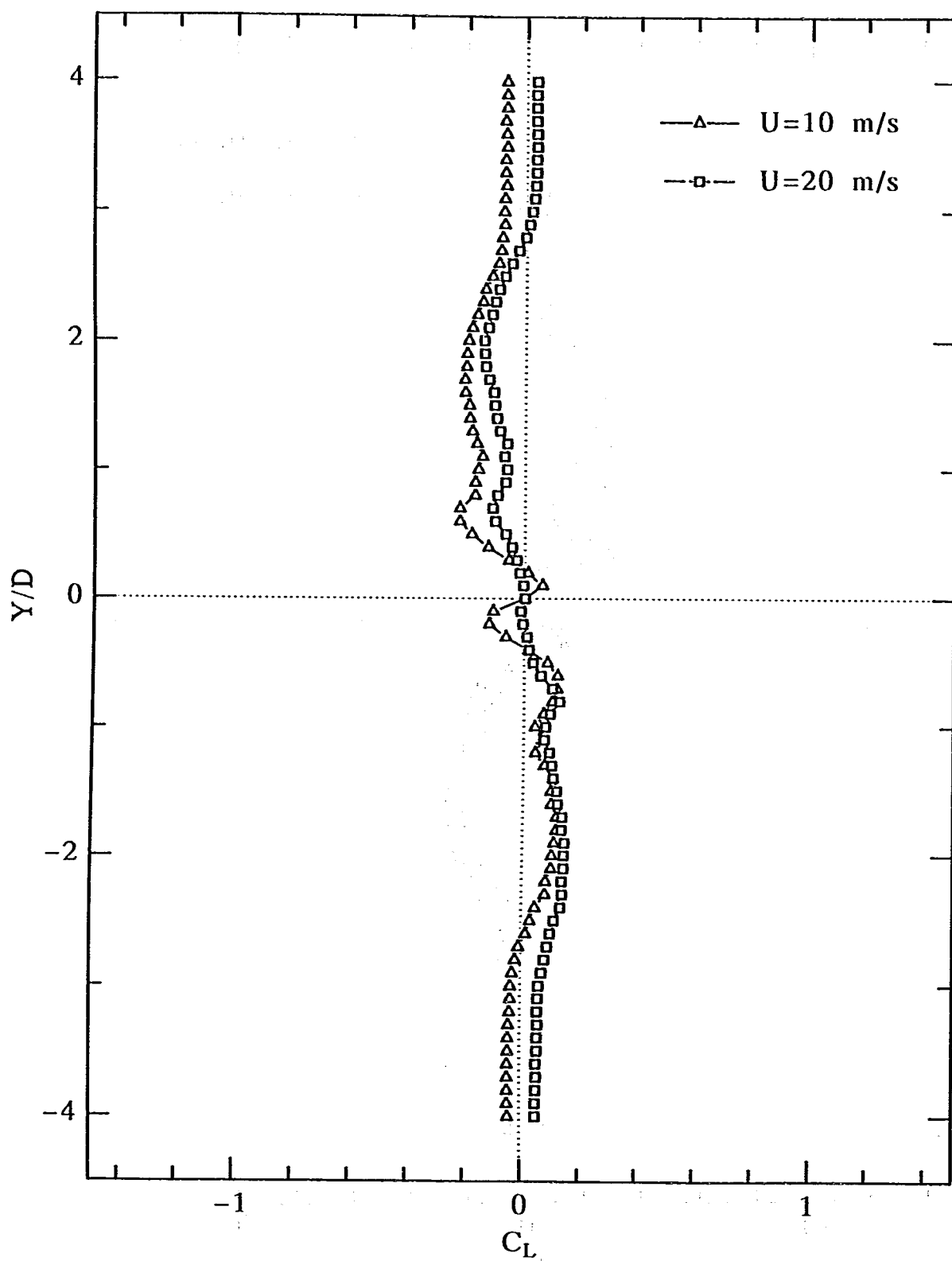
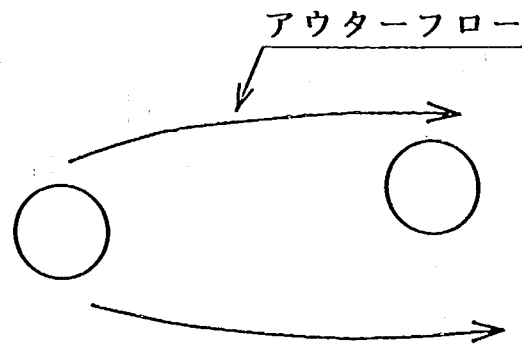


図-4.2.3.5 下流側ケーブルの揚力係数 (中心間隔 8 D)

Y/D が小さい場合



Y/D が大きい場合

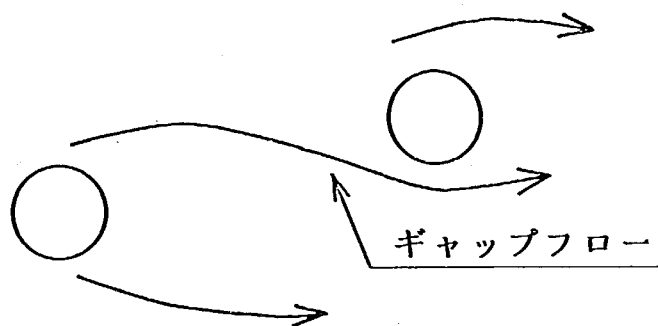


図-4.2.3.6 並列ケーブル周りの流れの模式図

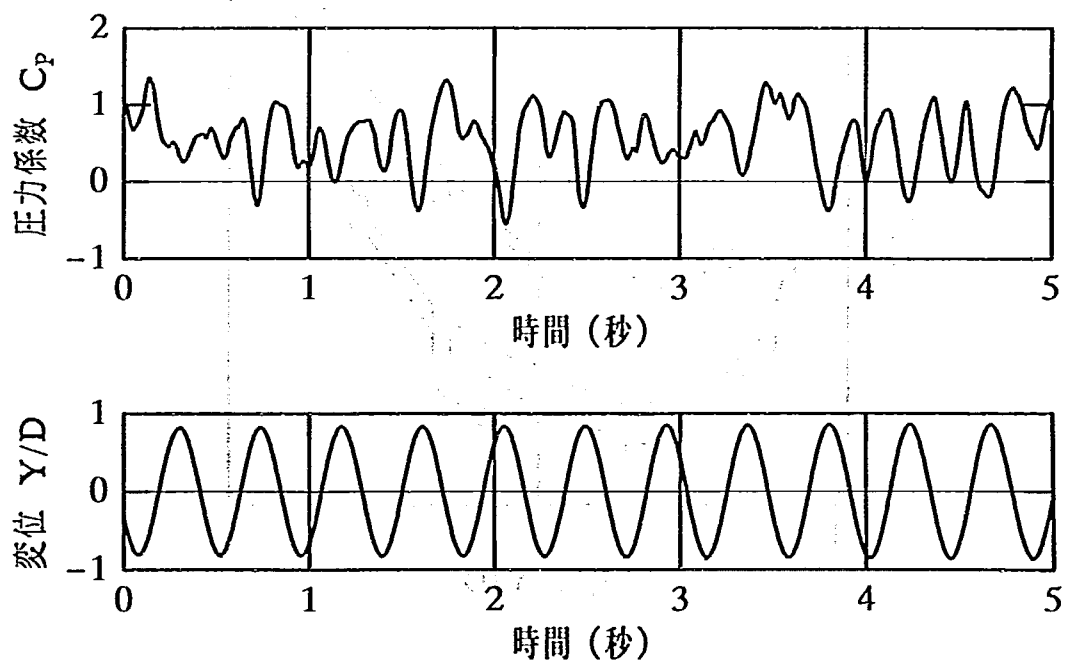


図-4.2.3.7 圧力測定波形の例

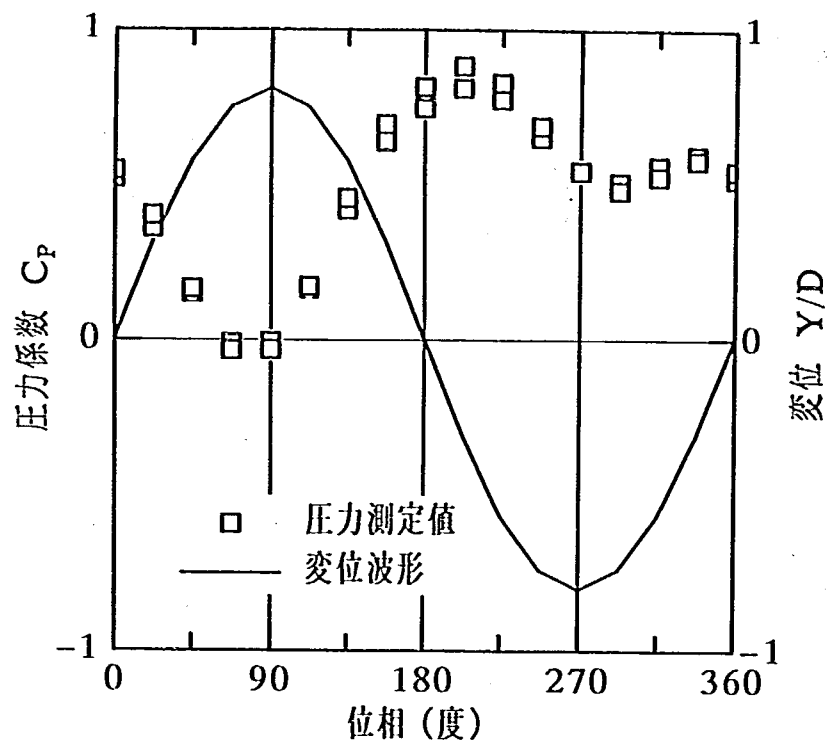


図-4.2.3.8 振動1周期における圧力の変化

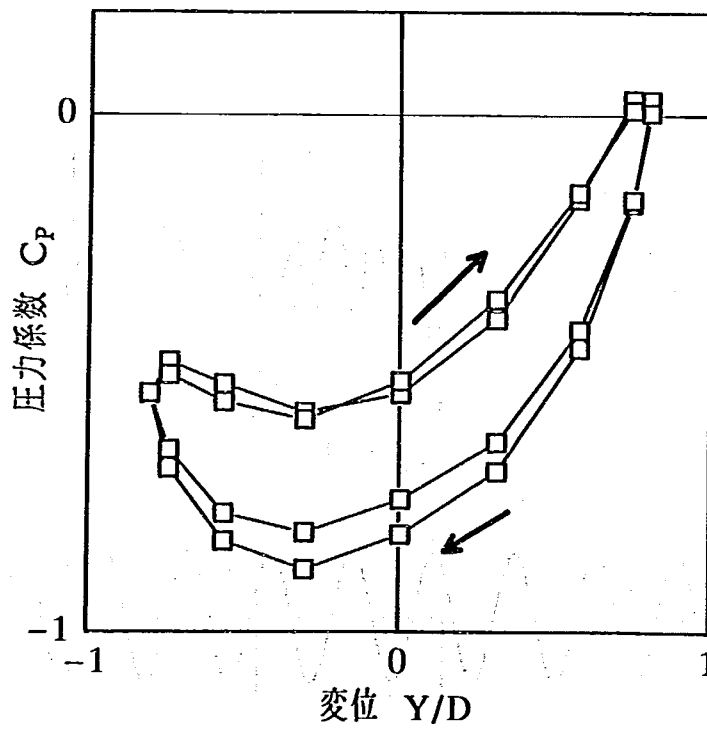


図-4.2.3.9 圧力と変位のリサーチ

4.2.4 偏角の影響

(1) 試験概要

並列ケーブルのウェークギャロッピングに及ぼす水平偏角の影響を明らかにする目的で風洞試験を実施した。試験方法としては、特に斜めケーブルにおいて端部処理の影響が試験結果に影響を及ぼさないように配慮し、2次元模型の中央断面回りにおける非定常圧力計測を採用した。

(2) 風洞試験要領

1) 使用風洞

試験を行った風洞設備は石川島播磨重工業㈱の構造物安定性風洞である。その主要な仕様は表-4.2.4.1に示すとおりである。

表-4.2.4.1 風洞設備

測定部断面 (幅×高さ)	1.5 × 2.5 m
風速範囲	0.5 ~ 20 m/s
型 式	エッフェル型

2) 試験条件・試験ケース

風洞試験条件、風洞試験ケースをそれぞれ表-4.2.4.2, 表-4.2.4.3に示す。

非定常圧力計測は強制振動法に依った。2次元剛体模型を風洞内に並列配置し、下流側ケーブルケーブルのみ鉛直1自由度に加振した。圧力孔は下流側のケーブルの中心断面に、15°毎に配列した。

表-4.2.4.2 試験条件

ケーブル径	D	100 mm
加振振動数	f	1.0 Hz
風洞風速	V	0 ~ 18 m/s
レイノルズ数	R_e	0 ~ 1.2×10^5
無次元風速	V_r	0 ~ 180

表-4.2.4.3 試験ケース

偏 角 β	ケーブル 間隔 S_h	迎 角 α	加振振動数 f	加振振幅 η
0 deg.	2 D	0 deg.	1.0 Hz	0.45 D
		10 deg.		
	4 D	0 deg.		
		10 deg.		
	6 D	0 deg.		
		10 deg.		
10 deg.	2 D	0 deg.		
	4 D	0 deg.		
	6 D	0 deg.		
30 deg.	2 D	0 deg.		
	4 D	0 deg.		
	6 D	0 deg.		
0 deg.	2 D	0 deg.		0.10 D
				0.15 D
				0.20 D
				0.25 D
				0.30 D
				0.35 D

(3) 風洞試験結果

非定常圧力を全周にわたって積分し下流側ケーブルの非定常空気力を算出し、水平偏角等のパラメータが及ぼす影響を評価した。結果は以下のように定義した非定常空気力係数で整理し、図-4.2.4.1に示した。

$$F(t) = \frac{1}{2} \rho \bar{U} d (C_R + i C_I) \frac{\eta}{d} e^{i\omega t}$$

$F(t)$: 非定常空気力

C_R, C_I : 非定常空気力係数

d : ケーブル径

η : 加振振幅

さらに、各点の変動圧力係数 $C_{p, rms}$ 、加振振幅との位相差の分布を図-4.2.4.2に示した。図中の位相差は、 $0 \leq \theta \leq 180^\circ$ （ケーブル下側）の範囲の圧力孔のものである。図-4.2.4.3には圧力の生波形の一例を示した（ $\alpha = 0^\circ$ 、 $\beta = 0^\circ$ 、 $Sh = 2D$ ）。

$$C_{p, rms} = \frac{P_{rms}}{1/2 \rho \bar{U}^2}$$

P_{rms} : 圧力 rms 振幅

ρ : 空気密度

$\overline{U}$: 平均風速

水平偏角については $\beta = 0^\circ \sim 30^\circ$ の範囲で試験を行った (図-4.2.4.1~4.2.4.2)。この範囲では β に伴う空気力特性の大きな変化は現れなかったが、 $\beta = 30^\circ$ では $\beta = 0^\circ$ に比べて若干、加振力が低減している。よってこれより β が大きくなるに従って安定化するものと考えられる。

図-4.2.4.1よりケーブル水平間隔 Sh が 2 D の場合と 4 D、6 D の場合とでは空気力特性が大きく異なっていることが分かる。すなわち、 $Sh = 2 D$ の場合は $V_r = 40$ 程度よりウェークギャロッピングの発生を示唆する大きな加振力 (揚力) が発生するが、4 D および 6 D では安定化している。これは、図-4.2.4.2 に示した変動圧力分布にも端的に現れている。 $Sh = 2 D$ においては上流側に流れの switch が原因であると考えられる大きな圧力変動が確認できる。この部分に作用する変動空気力は、振幅との位相差を考慮すると大部分が剛性付加効果として、さらに加振力として作用していると考えられウェークギャロッピングの要因となっていると考えられる。 $Sh = 4 D$ 、6 D では上流側の圧力変動は顕著ではなく、位相特性からも安定となっている。

さらに、 $Sh = 2 D$ 、 $\beta = 0^\circ$ に関して、空気力の振幅依存性を目的で加振振幅を変化させた試験を実施した。振幅が変化するに従って位相特性が大きく変化し、 $\eta = 0.2 \sim 0.3 D$ を境にして、それ以上になるとウェークギャロッピング発生時の位相特性に移行するといった複雑な振幅依存性を示している。

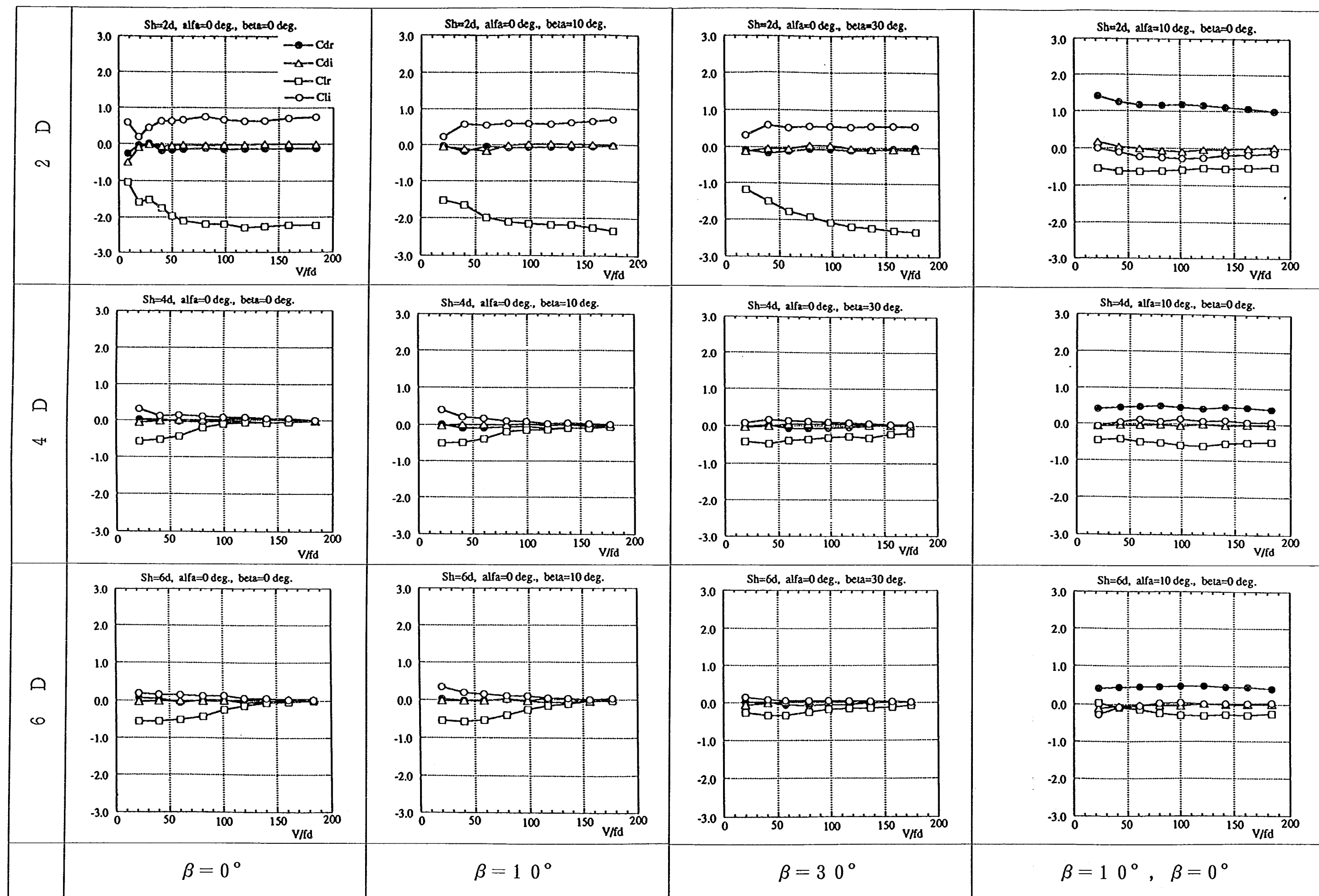


图-4.2.4.1(1) 非定常空気力係数 (振幅0.45D)

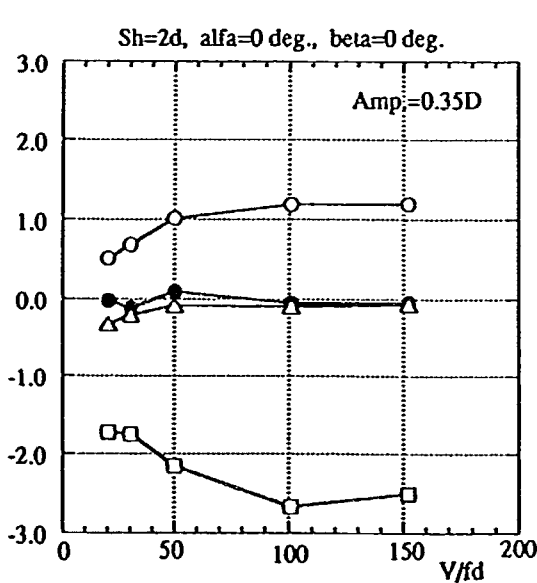
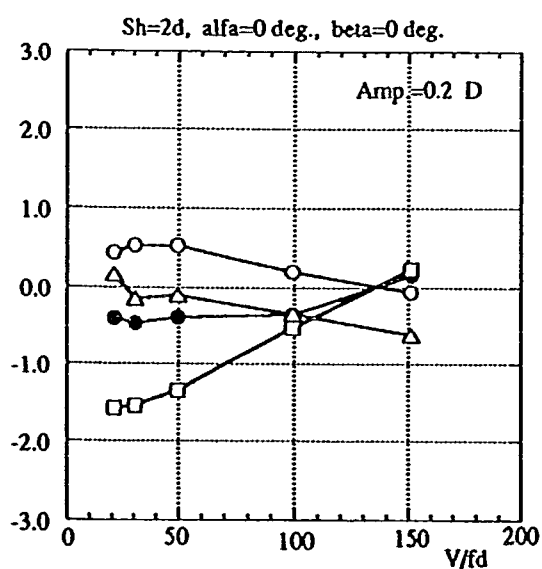
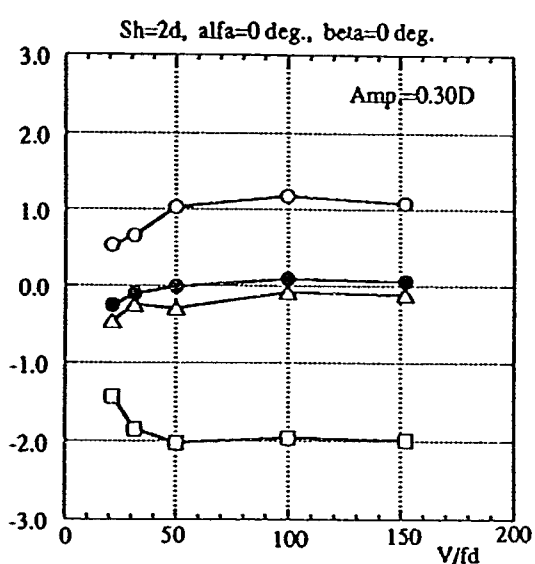
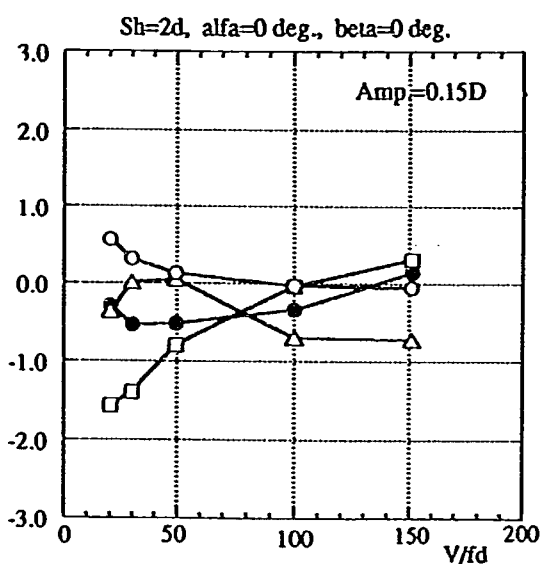
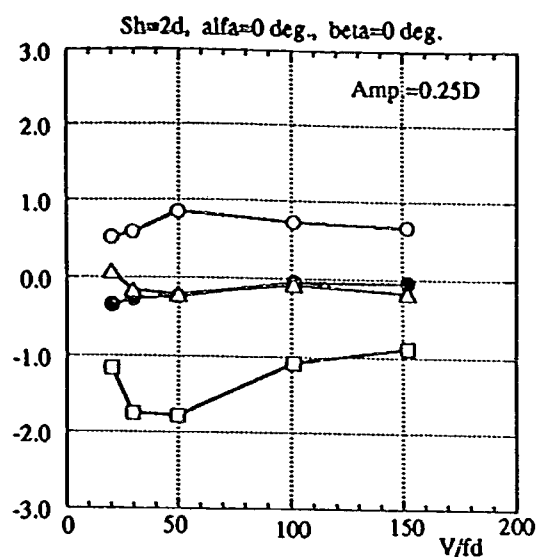
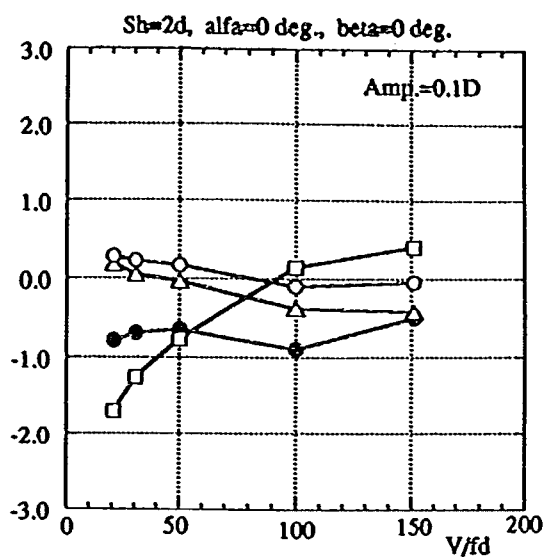


圖-4.2.4.1 (2) 非定常空氣力氣力係數 ($S_b = 2D$, $\alpha = 0$ deg., $\beta = 0$ deg.)

The second part of the document provides a detailed breakdown of the company's revenue streams. It identifies the primary sources of income and analyzes their contribution to the overall financial performance. This section also includes a comparison of current revenue trends with historical data to identify patterns and growth opportunities.

The third part of the document focuses on the company's expenses and costs. It details the various categories of expenditures, from operational costs to capital investments. The analysis highlights areas where costs can be optimized and suggests strategies for reducing unnecessary expenses while maintaining the quality of operations.

The fourth part of the document presents a comprehensive overview of the company's financial position. It includes a summary of the balance sheet, income statement, and cash flow statement. This section also provides a clear picture of the company's liquidity, solvency, and overall financial health.

The fifth part of the document discusses the company's future financial outlook. It outlines the projected revenue and expenses for the upcoming period, taking into account various market factors and internal business developments. This section also includes a risk assessment and a contingency plan to address potential challenges.

The sixth part of the document provides a detailed analysis of the company's debt obligations. It lists all outstanding loans and interest payments, and evaluates the company's ability to service its debt. This section also discusses the impact of debt on the company's financial flexibility and offers recommendations for managing debt effectively.

The seventh part of the document focuses on the company's equity structure. It details the ownership shares, including common and preferred stock, and analyzes the impact of equity financing on the company's capital structure. This section also discusses the company's policies regarding dividends and share repurchases.

The eighth part of the document provides a detailed analysis of the company's tax obligations. It outlines the various tax liabilities and credits, and evaluates the company's tax compliance. This section also discusses the company's strategies for minimizing its tax burden while remaining fully compliant with all applicable laws.

The ninth part of the document discusses the company's financial reporting and disclosure practices. It outlines the company's commitment to transparency and provides a detailed overview of its reporting procedures. This section also includes a discussion of the company's internal controls and the role of the audit committee.

The tenth part of the document provides a final summary of the company's financial performance and outlook. It reiterates the key findings from the previous sections and offers a clear, concise statement of the company's financial position and future prospects.

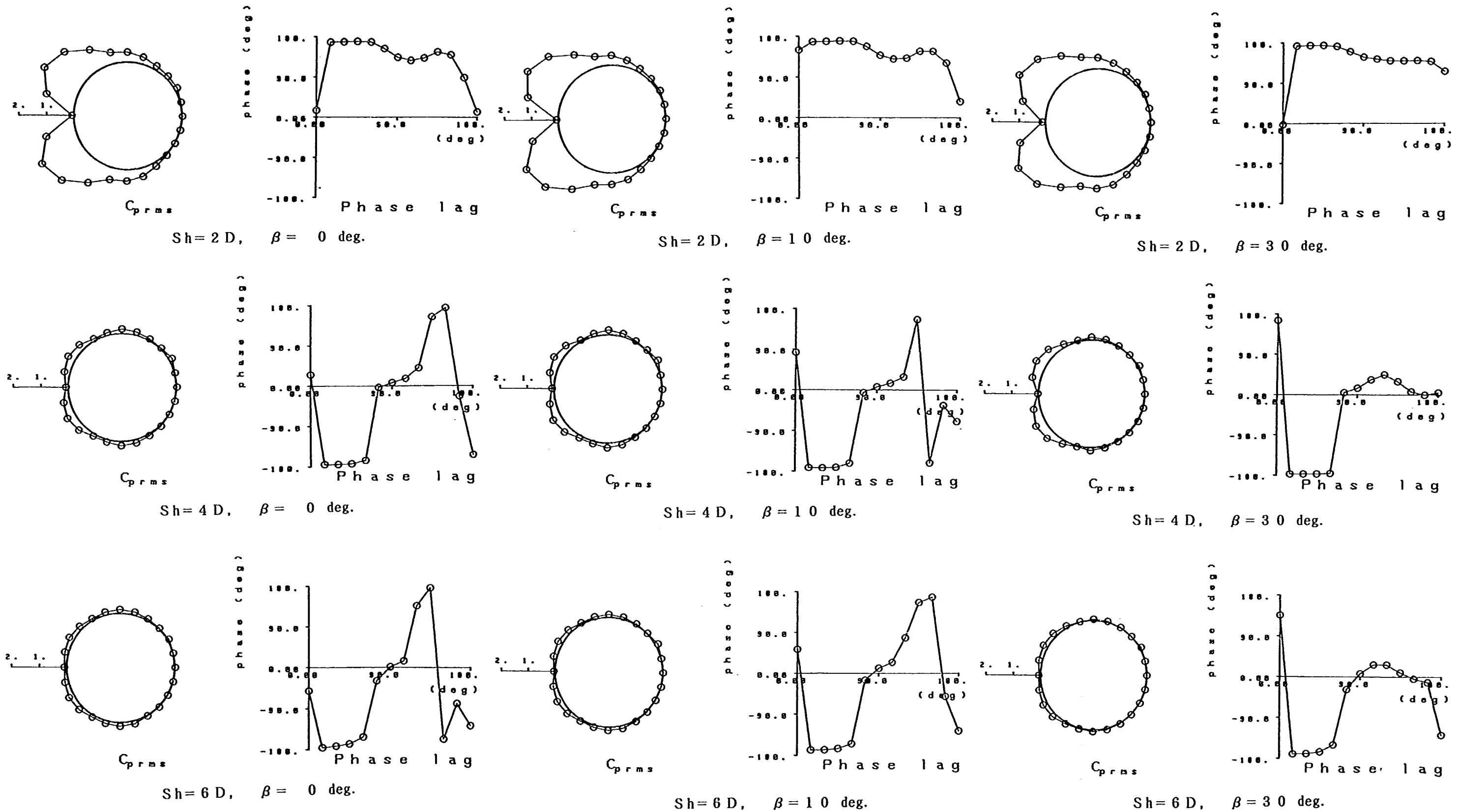
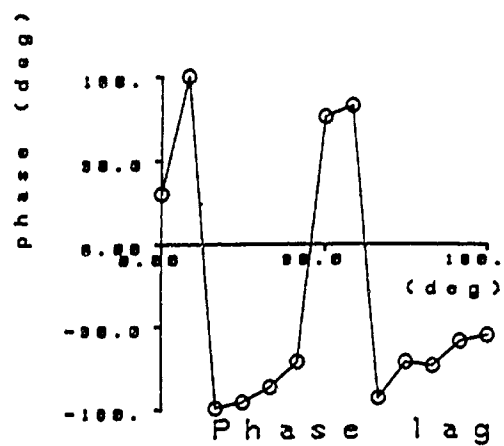
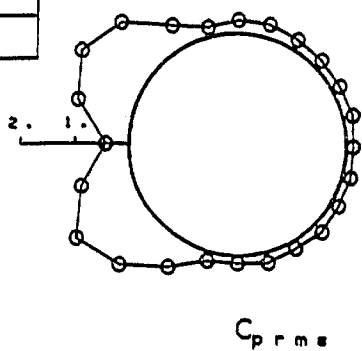


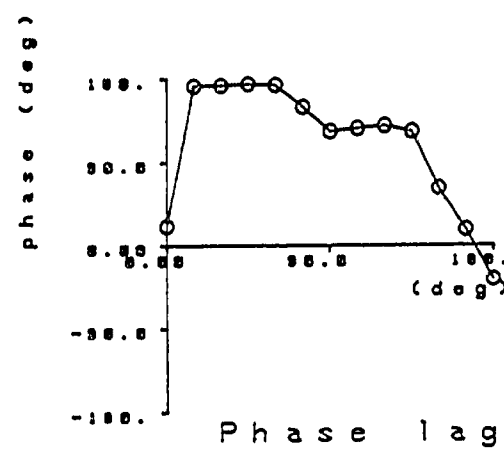
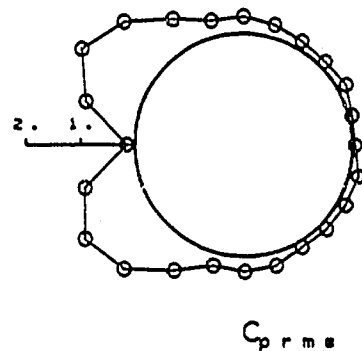
図-4.2.4.2(1) 非定常圧力振幅と位相差 その1

ケーブル間隔	2 D
迎角, 水平偏角	0 deg, 0 deg.
加振振幅	0.45 D
加振振動数	1.0 Hz

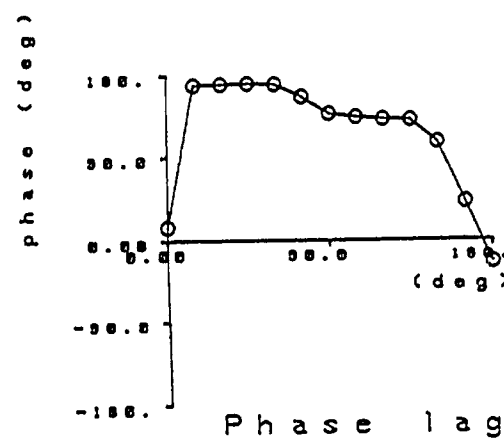
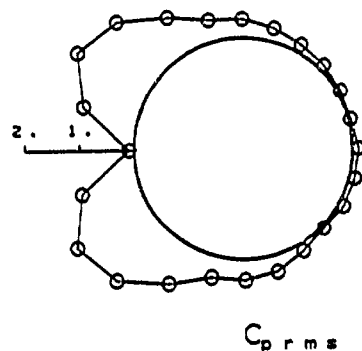
$V_r = 20$



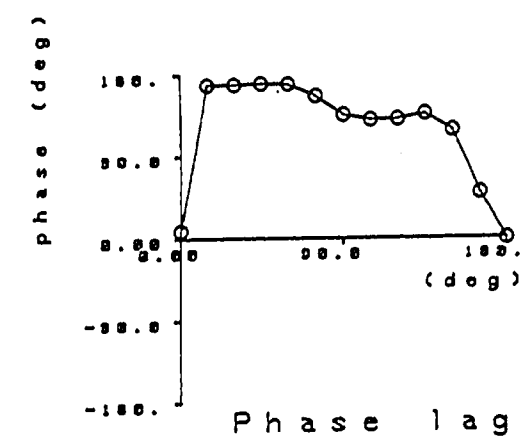
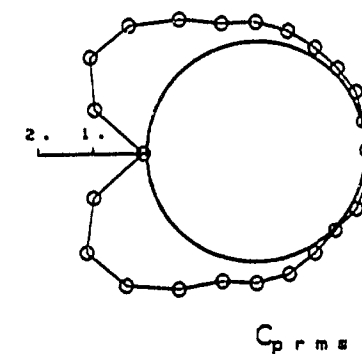
$V_r = 40$



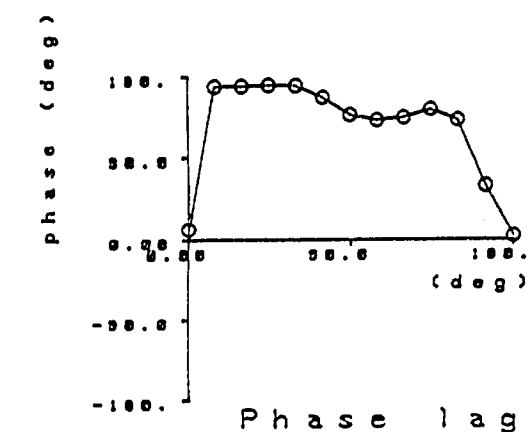
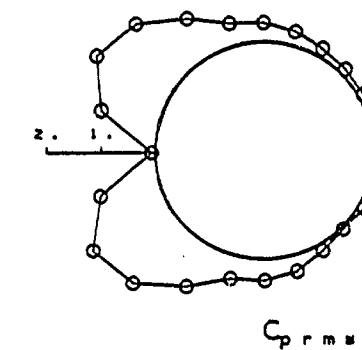
$V_r = 60$



$V_r = 100$



$V_r = 140$



$V_r = 180$

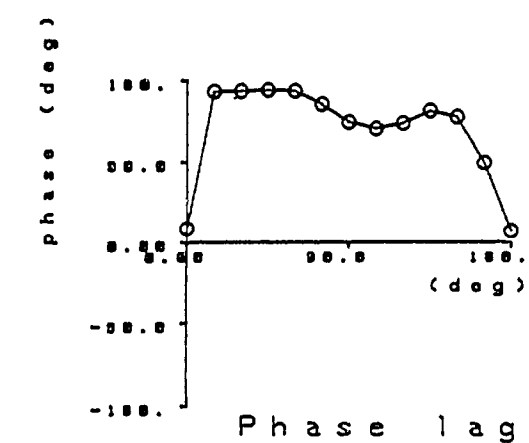
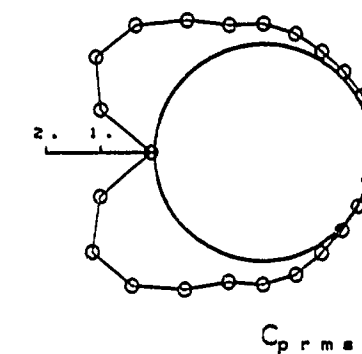
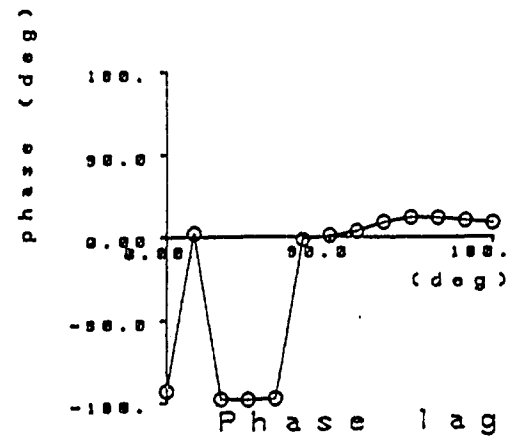
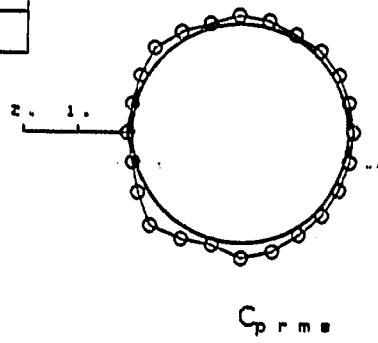


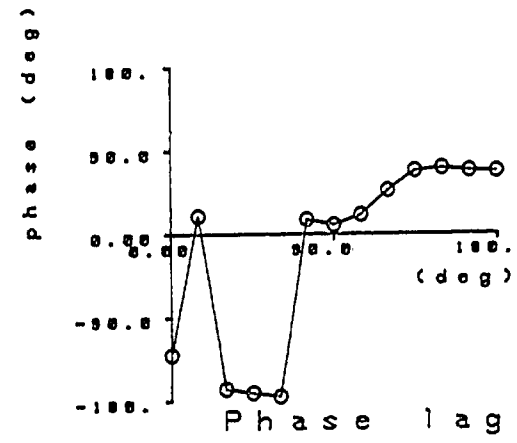
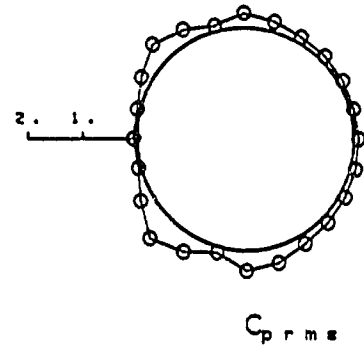
図-4.2.4.2(2) 非定常圧力振幅と位相差 その2

ケーブル間隔	2 D
迎角, 水平偏角	0 deg, 0 deg.
風洞風速	15m/s
加振振動数	1.0Hz

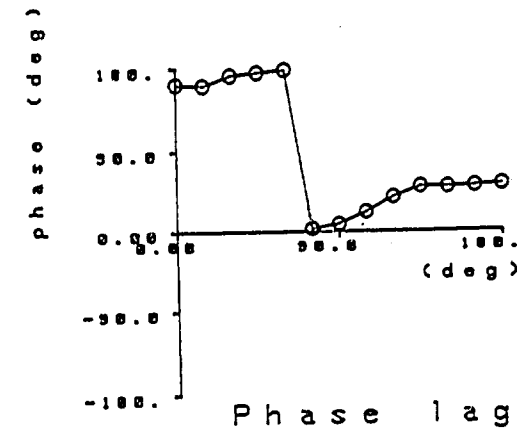
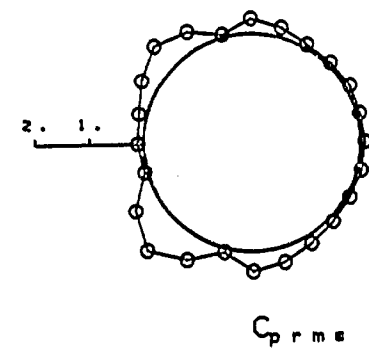
振幅 = 0.10 D



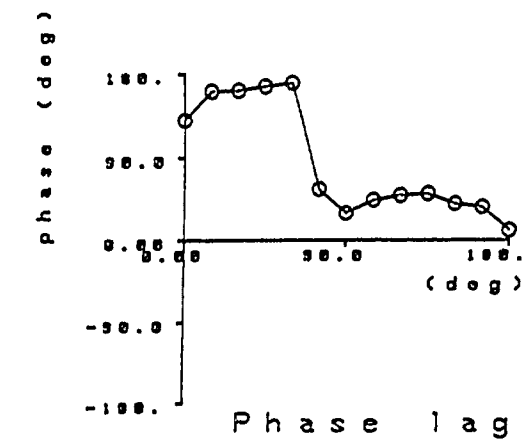
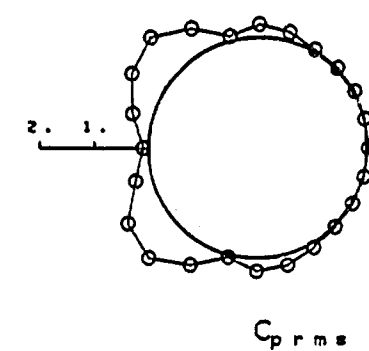
振幅 = 0.15 D



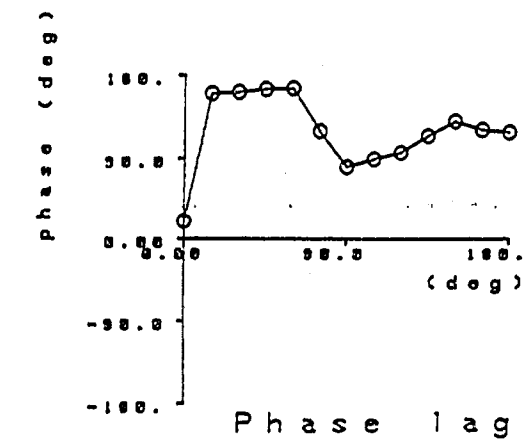
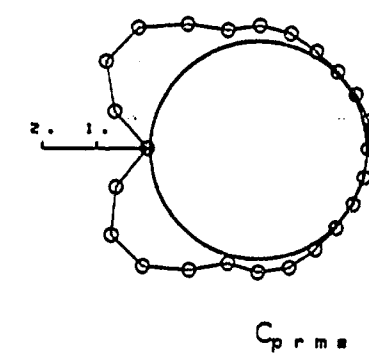
振幅 = 0.20 D



振幅 = 0.25 D



振幅 = 0.30 D



振幅 = 0.35 D

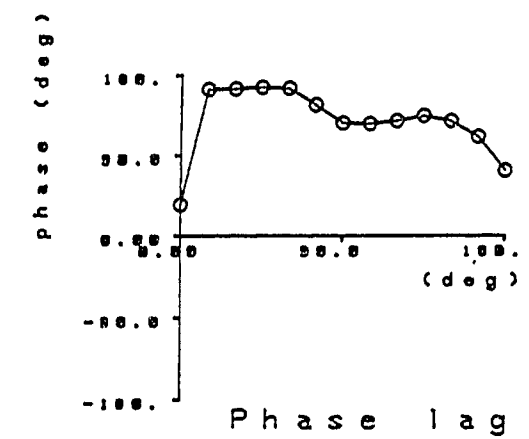
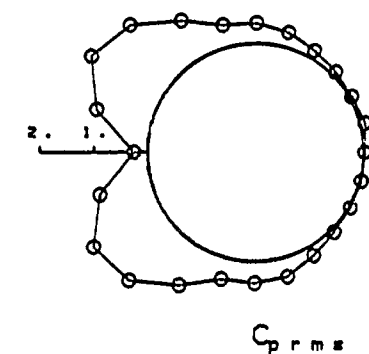
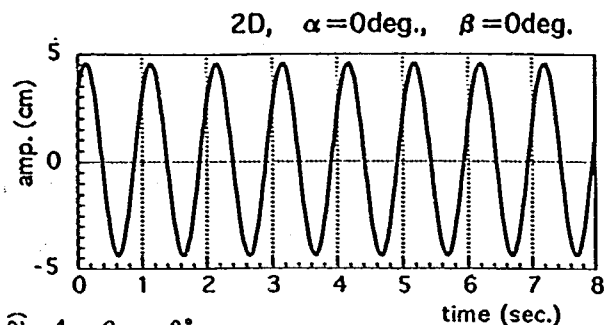


図-4.2.4.2(3) 非定常圧力振幅と位相差 その3



ケーブル間隔	2 D
迎角, 水平偏角	0 deg., 0 deg.
無次元風速	150
加振振動数	1.0 Hz
加振振幅	0.45 D

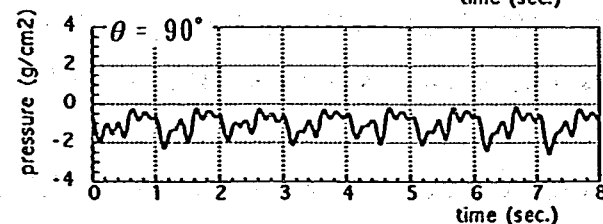
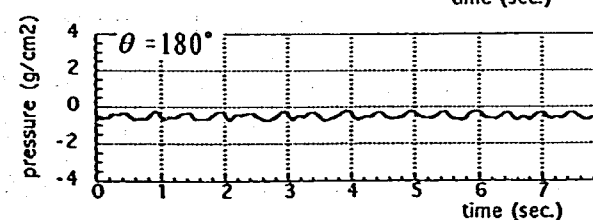
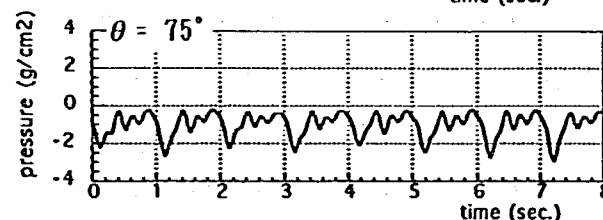
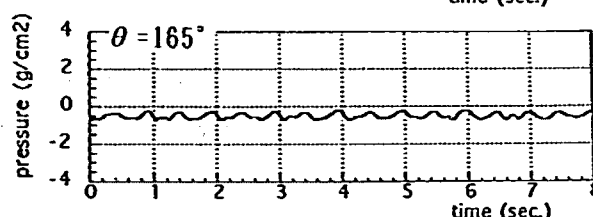
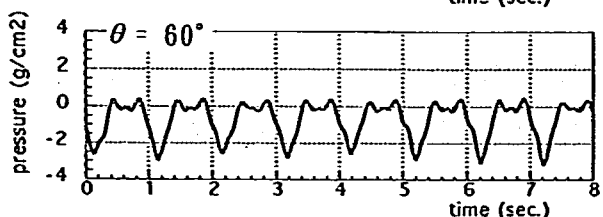
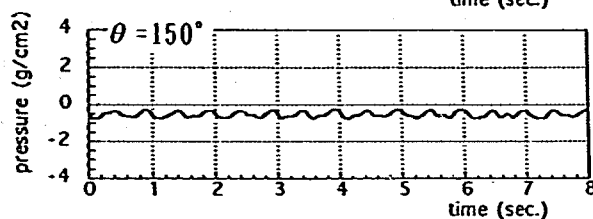
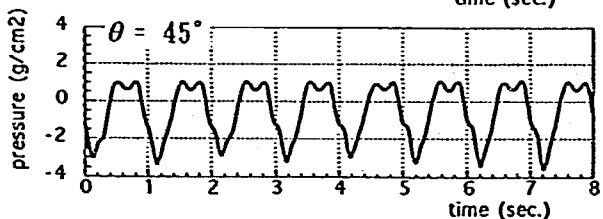
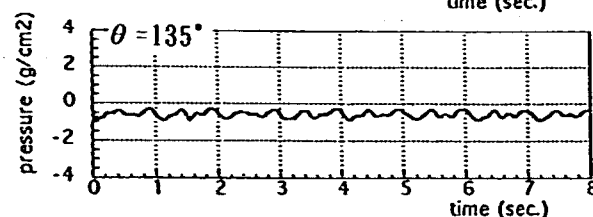
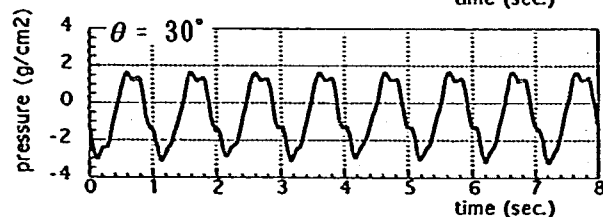
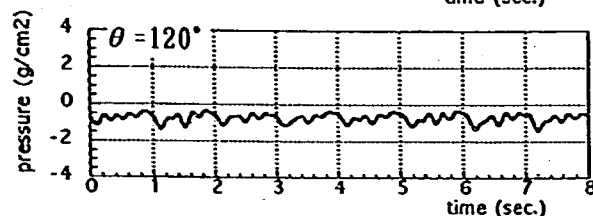
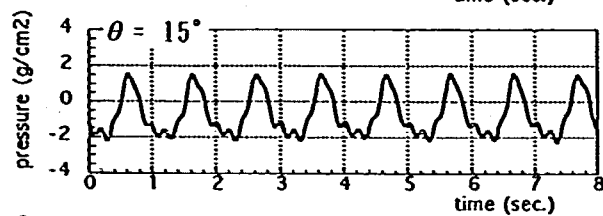
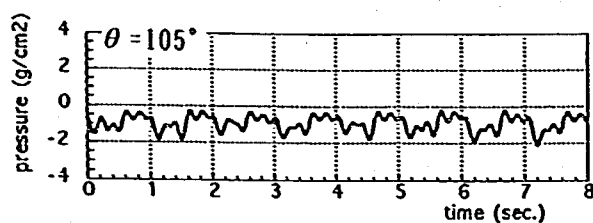
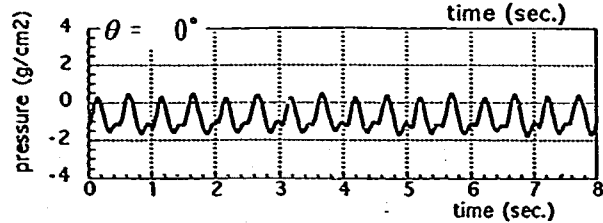


図-4.2.4.3 圧力時刻歴波形

4.3 新しい構造力学的制振装置の開発に関する研究（その1）

4.3.1. 概 要

(1) 研究の目的

斜張橋に並列配置されたケーブルに生じるウェイクギャロッピングに対して、主に減衰機能を備えた構造力学的制振装置（以降、スパーサと称す）を設置することによる制振手法の開発、および開発したスパーサを用いて耐風制振設計を行う手法を確立することを目的とする。

(2) 研究の方法

本年度は共同研究期間の最終年度にあたり、昨年度までに開発したスパーサの改良・改善、あるいは新しい減衰機構を持つスパーサの開発を行う。これらの装置の性能を確認するために、実大規模レベルの並列ケーブルを用いた振動実験を実施する。同時に、ケーブルのたわみ、ねじりに関する特性を測定する。また、風況下におけるスパーサの有効性を調べるために、風洞実験を実施する。

最後に、これらの実験の結果を踏まえ、数値解析手法の検討を行うとともに、簡易計算手法についても検討を行う。

(3) 研究成果の概要

1) 実大並列ケーブルによるスパーサの減衰機能に関する実験

3種類4タイプの高減衰ゴムを用いたスパーサと、1種類2タイプの摩擦型減衰機能付きスパーサを考案して、実大規模の並列ケーブル（SEE-F360T、長さ $L=100\text{m}$ ）を用いて振動実験を行い、減衰性能の確認を行った。主要な結果を以下に示す。

- ① 実大ケーブルのたわみ振動およびねじり振動の特性を把握した。
- ② スパーサの種類により、減衰性能に振幅依存性のあるものとほとんどないものがある。
- ③ 高減衰ゴムを用いたスパーサによる付加対数減衰率は、0.03～0.1程度であった。

2) 風洞実験

高減衰ゴムを用いたスパーサ（せん断型）と摩擦型減衰機能付きスパーサ（摩擦型）について、ウェイクギャロッピングに対する制振効果を確認するために、風洞実験を行った。得られた主要な知見は以下のようである。

- ① スパーサの有無に関わらず、不安定なリミットサイクルを持つハード型のウェイクギャロッピングが発現するが、ウェイクギャロッピングの発現風速はせん断型スパーサ、摩擦型スパーサともにスパーサの減衰性能にほぼ比例して高くなった。
- ② スパーサのない状態で構造減衰が0.01程度であるケーブルに、構造減衰が0.1程度となる減衰性能を有するスパーサ（実大実験で得られた減衰性能に対応）を取り付けるとウェイクギャロッピングは 16m/s ($V_r=119$) まで発現しなくなった。さらに、スパーサの減衰性能を高めるともっとも良好な場合で 21m/s ($V_r=157$) まで上昇した。
- ③ スパーサのない状態で構造減衰を0.1程度まで高くすると、ウェイクギャロッピングの発現風速は約 22m/s ($V_r=166$) に上昇した。したがって、スパーサと他の制振手法を組み合わせることによっても発現風速を高めることが可能であると考えられる。

- ④ スペーサがない場合は上流側が固定されているかどうかに関わらず、ほぼ同一の挙動を示すが、スペーサがある場合は上流側を固定するとウェイクギャロッピングの発現風速がやや低くなる傾向を示した。

3) 数値解析による評価

幾何学剛性を考慮した3次元複素固有値解析の結果、以下のような知見を得た。

- ① ケーブルのねじり剛性および回転慣性を適切に考慮すれば、バネ、ダッシュポット、剛体要素を用いたモデル化により、ケーブルに付加される減衰を十分な精度で予測できることが分かった。
- ② スペーサの減衰係数、バネ定数をパラメトリックに変化させて解析した結果、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。
- ③ スペーサの減衰係数、バネ定数をパラメトリックに変化させて解析した結果、スペーサの減衰係数には最適値がある。
- ④ ケーブルのねじり剛性が増加すると、ケーブルに付加される対数減衰率も増加する。
- ⑤ スペーサ個数をパラメータとし、スペーサの減衰係数、バネ定数それぞれの和を一定とした条件下で解析した結果、スペーサの設置個数は、減衰の付加にはほとんど影響しない。同様に、ケーブルの固有振動数にもほとんど影響しない。
- ⑥ 幾何学剛性を考慮した3次元複素固有値解析のかわりに、簡易評価方法として2質点モデルを用いても十分な精度でケーブルの減衰付加を評価できることが分かった。また、2質点モデルの簡易式を求めた。

4.3.2 実大振動実験に用いた並列ケーブルの特性

(1) 実験方法

並列ケーブル供試体の構成を図-4.3.2.1に、諸元を表-4.3.2.1に示す。実験に用いたケーブルは2条のSEEE工法のF360T（ポリエチレン被覆）、延長は98.46m、計画導入緊張力は165tfである。両端の固定点は、許容荷重が500tfのプレテンション方式の緊張アバットである。ケーブル振動長は、ケーブルマンション間の距離とした。

試験項目は、以下の3点である。

- ① 1本のケーブルたわみ振動特性の把握（たわみ振動試験）
- ② 1本のケーブルのねじれ剛性およびねじれ振動特性の把握（ねじり試験）
- ③ 各種減衰機能付きスペーサを取り付けた並列ケーブルの振動特性の把握（並列ケーブル試験）

表-4.3.2.1 ケーブルの諸元

呼 名	F360t
構 成	19× ϕ 12.7
全 長	100.03m
引 張 荷 重	338.2tf
断面積 (A)	1875.5mm ²
重 量 (W)	18.53kg/m
直 径 (D)	83.5mm
ケーブル間隔	3D=250.5mm
振 動 長	98.46m
計画緊張力 (N)	165tf
計算振動数 (f)	1.50Hz

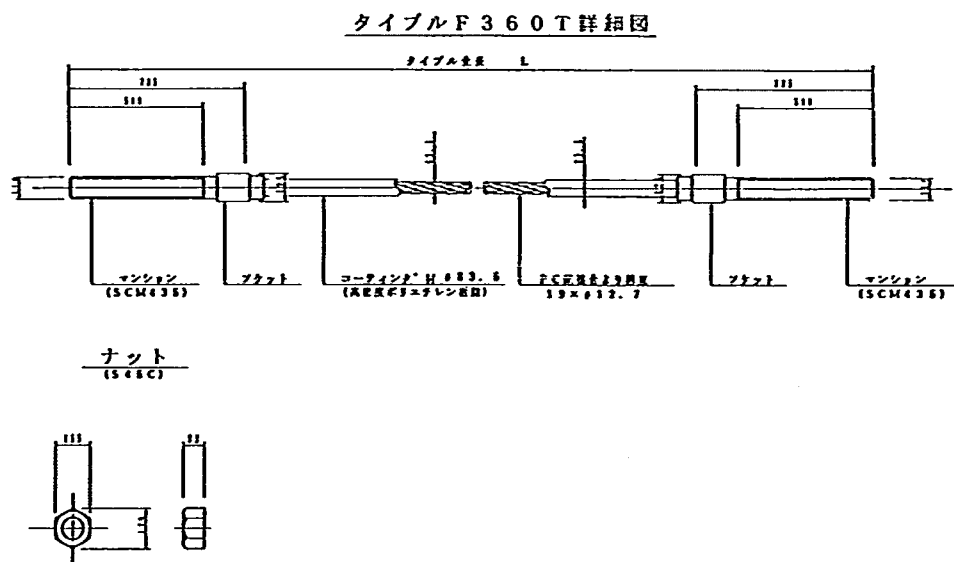
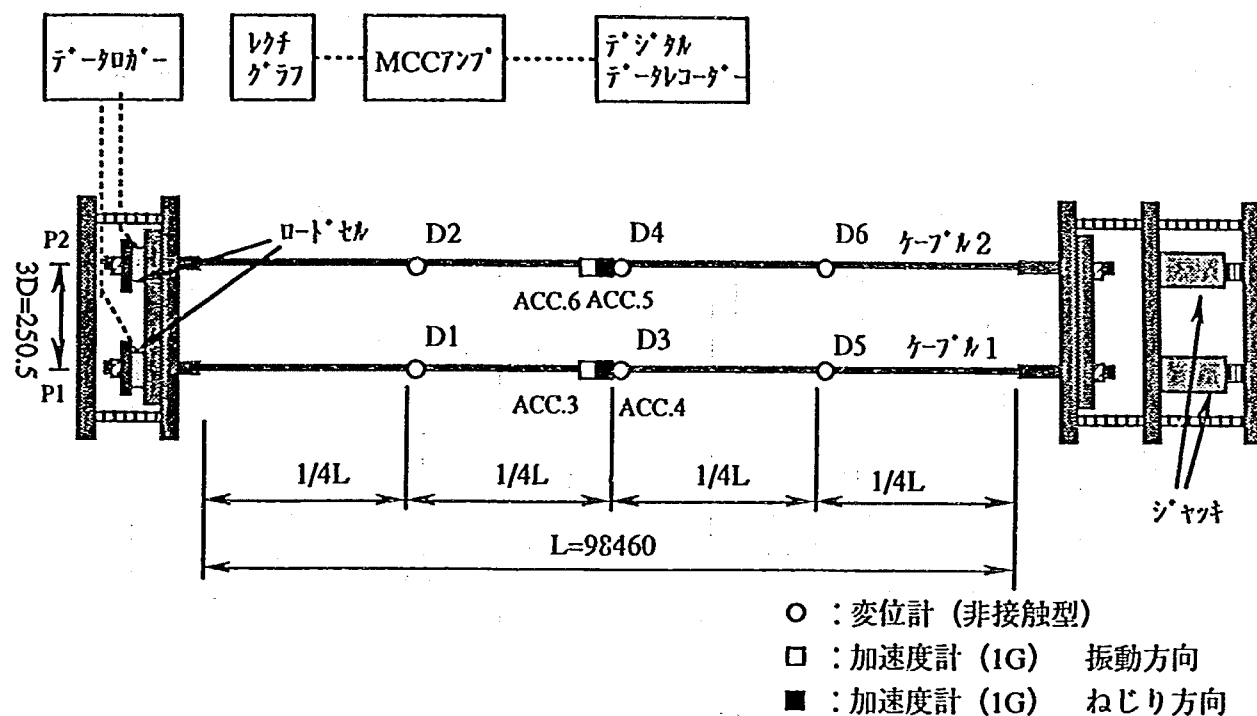
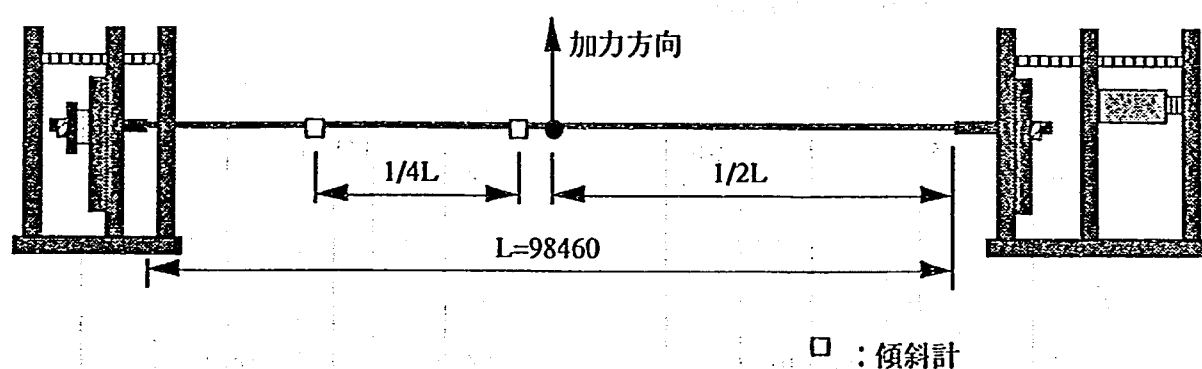


図-4.3.2.1 ケーブルの構造

計測方法を図-4.3.2.2に示す。ケーブルの緊張力はロードセルで管理した。ケーブルの鉛直変位は非接触型変位計で、ねじり加速度をひずみゲージタイプの加速度計 (1G) で測定した。取付け位置は各ケーブルの振動長の1/4点、1/2点、3/4点の3点である。計測データ100HzでA. D. 変換した。静的なねじり载荷では、1/4振動長間のねじり角度差を2台の傾斜計 (5°) で測定した。



a) たわみ振動試験&並列ケーブル試験



ねじり試験方法 (実験装置側面図)

b) ねじり試験

図-4.3.2.2 計測図

(2) ケーブルの特性

1) ケーブルのたわみ振動特性

ケーブルのたわみ振動特性は、ケーブルのたわみ振動の固有振動数の測定と、たわみ1次と2次の構造減衰の測定を行った。ケーブルの固有振動数の測定は、電磁型起振器を用いたスイープ試験と、衝撃加力による振動波形を周波数分析することにより算出した。ケーブルの構造減衰の測定は、対象モードのからの減衰自由振動波形から求めた。

スイープ試験によるケーブルのたわみ振動の固有振動数の同定は、起振器をケーブル振動長の1/10点に設置し、1/100Hzピッチで加振し、1/4点と3/4点の変位の共振曲線より求めた。図-4.3.2.3に各ケーブルの共振曲線を示す。

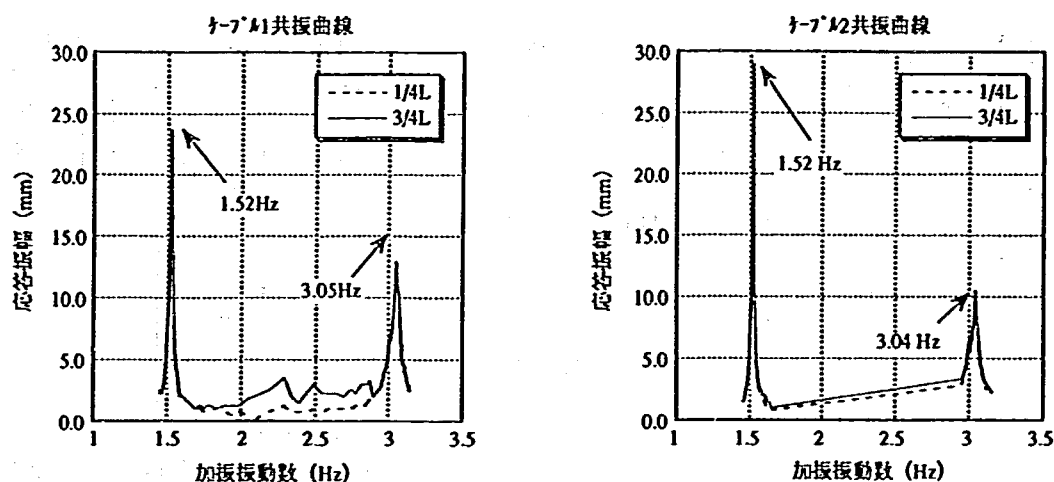


図-4.3.2.3 ケーブルの共振曲線

衝撃加力によるケーブルのたわみ振動の固有振動数の同定は、ケーブル振動長の1/4点から固定側に2.1mの位置で、たわみ方向に張力をかけた10番線を切断することにより自由振動させた。FFTは100 Hzで60秒間のデータを8192ケにし行った。

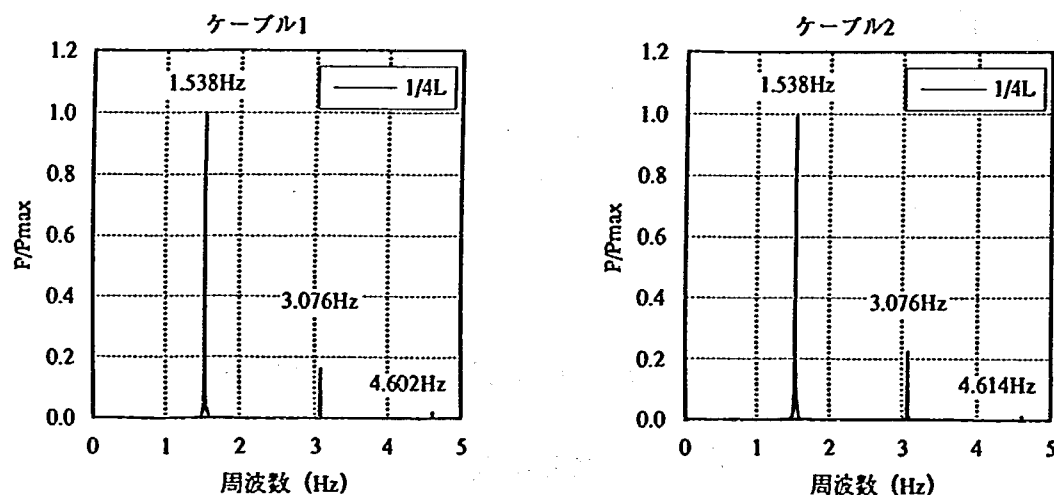


図-4.3.2.4 ケーブルの変位パワースペクトル

ケーブルのたわみ振動の固有振動数の測定結果を表-4.3.2.2に示す。

表-4.3.2.2 たわみ振動の固有振動数

	ケーブル 1			ケーブル 2		
	1次	2次	3次	1次	2次	3次
スワイプ試験時張力 (tf)		164.9tf			165.2tf	
スワイプ試験 (Hz)	1.52	3.05		1.52	3.04	
衝撃試験時張力 (tf)		166.0tf			166.8tf	
衝撃試験 (Hz)	1.54	3.08	4.6	1.54	3.08	4.61

ケーブルのたわみ振動の1次および2次の腹の部分で人力によりそれぞれのモードを生じさせ、自由振動の腹の部分の振幅波形よりケーブルの対数減衰率を求めた。測定結果を表-4.3.2.3に示す。

表-4.3.2.3 各ケーブルの構造減衰率

自由減衰振動試験結果 (人力加振法による)						
ケーブル	ケーブル 1			ケーブル 2		
緊張力	165.8tf			166.7tf		
モード	1次モード	2次モード		1次モード	2次モード	
位置	1/2L	1/4L (西)	1/4L (東)	1/2L	1/4L (西)	1/4L (東)
1	0	3.06E-4	5.57E-4	0	7.42E-4	9.80E-4
2	0	3.51E-4	3.51E-4	0	1.09E-3	1.24E-3
3	0	9.01E-4	9.01E-4	0	6.06E-4	5.47E-3
平均	0	5.19E-4	6.03E-4	0	8.13E-4	9.22E-4
	0%	0.06%		0%	0.08%	

2) ケーブルのねじり特性

ケーブルのねじり特性は、1本のケーブルの静的加力によるねじり剛性の測定と、衝撃加力によるねじり振動の固有振動数と振動数から推定できるねじり剛性、および、ケーブルのねじり振動の構造減衰を測定した。

ケーブル中央に载荷した場合の、ねじりモーメントとねじり角度の関係を図-4.3.2.5に示す。2点のねじり角度差から静的なねじり剛性を算出した。結果を表-4.3.2.4に示す。平均的なねじり剛性は、 $5.45E+6 \text{ kgfcm}^2$ であった。

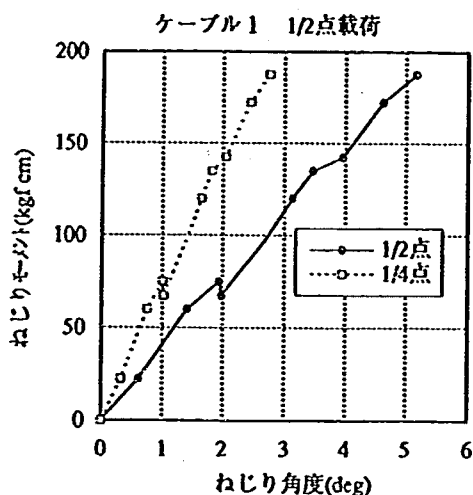


図-4.3.2.5 ケーブルのねじり角とねじりモーメントの関係

表-4.3.2.4 ケーブルのねじり剛性

	载荷点	ねじりモーメント(kgfc m)	ねじり角(deg)	計測長	ねじり剛性値(kgfc m ²)
ケーブル1	1/2L	187.5	2.40	1/4L	5.50E+06
	1/2L	172.5	2.17	1/4L	5.61E+06
	平均				5.55E+06
ケーブル2	1/2L	157.5	2.12	1/4L	5.25E+06
	1/2L	165.0	2.08	1/4L	5.59E+06
	平均				5.42E+06
	1/4L	217.5	1.42	1/4L	5.38E+06
	1/4L	217.5	1.42	1/4L	5.40E+06
	平均				5.39E+06
全平均					5.45E+06

ケーブル中央でねじりモーメントを衝撃加力し、ケーブル中央の回転方向の加速度の減衰自由振動波形を、周波数分析し、ケーブルのねじり固有振動数を求めた。周波数分析結果を図-4.3.2.6に示す。ケーブル1では、ねじりの1次と3次振動が卓越して発生している。ねじりの1次固有振動数は3.45 Hz程度である。ケーブルのねじり固有振動数とねじり剛性を既知数として、はりのねじり振動の運動方程式より、ケーブルの見かけの直径を求めると71 mmになる。これは、ケーブル外径の85%、線材コアの112%に相当する。

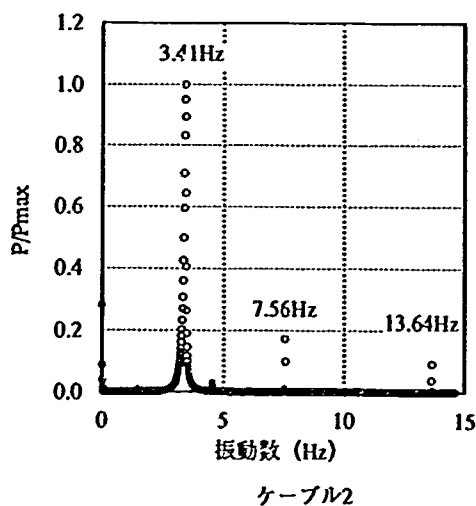
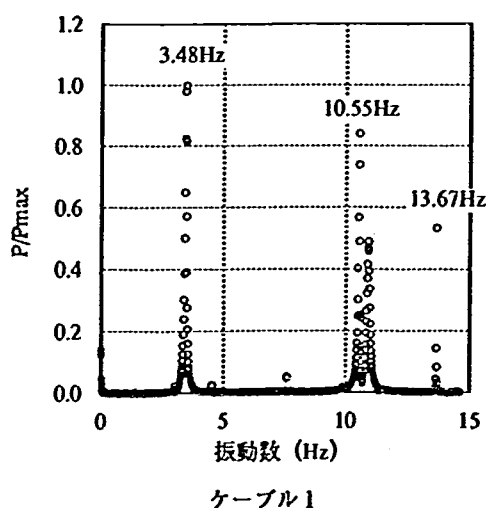


図-4.3.2.6 ねじり振動の周波数分析

ねじりの減衰自由振動波形を図-4.3.2.7に示す。生波形の内には高次の振動成分が含まれているので6 Hzのローパスフィルターをかけ、1次振動成分のみを構造減衰の調査対象とした。各波毎の対数減衰率を前後5ヶの移動平均をとり、各波の対数減衰率とした。計算結果を図-4.3.2.8に示す。対数減衰率は、加速度に依存し、加速度が50galから300galの間では概ね0.06~0.08程度であった。

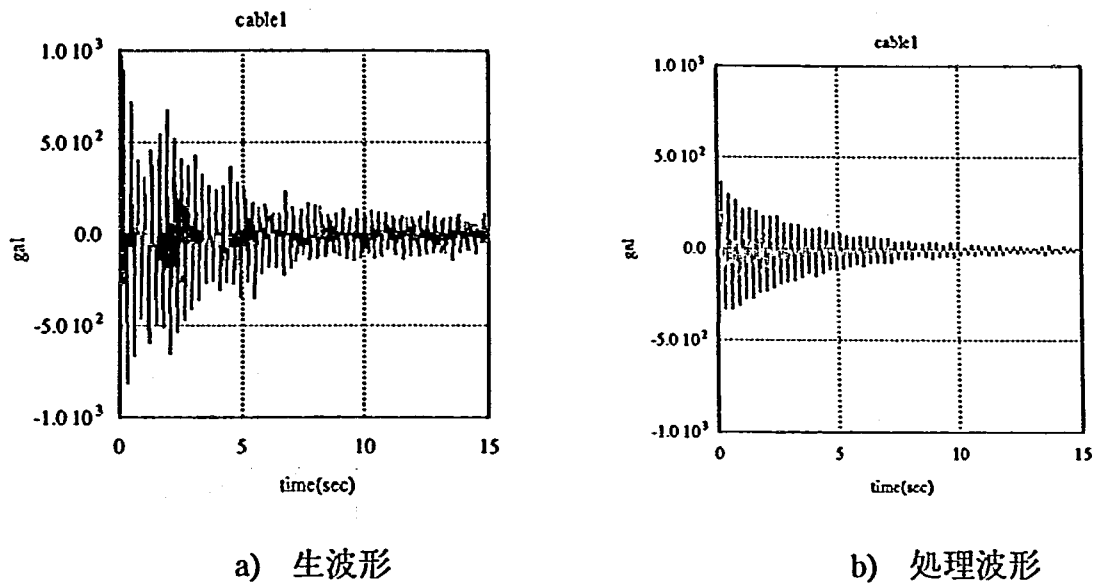


図-4.3.2.7 ねじり1次モードの減衰自由振動波形

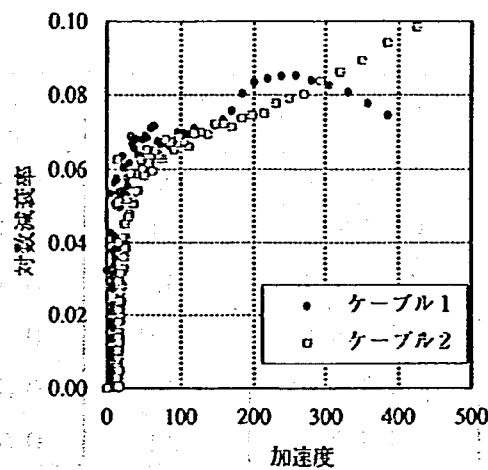


図-4.3.2.8 ケーブルのねじり1次モードの構造減衰

4.3.3 高減衰ゴムを用いたスペーサ（その1）

(1) 使用したスペーサの概要

使用したスペーサの概要を図-4.3.3.1に示す。スペーサの構造は、ケーブルとスペーサを剛結する固定型と、ケーブルとスペーサの結合部分にベアリングを設置し回転自由度を与えた回転型を用いた。スペーサの減衰機能は、高減衰ゴムを用いることにより付与した。減衰性能は、高減衰ゴムの形状および設置方法によって調整した。高減衰ゴムのせん断ひずみが12.5%時の性能を表-4.3.3.1に示す。

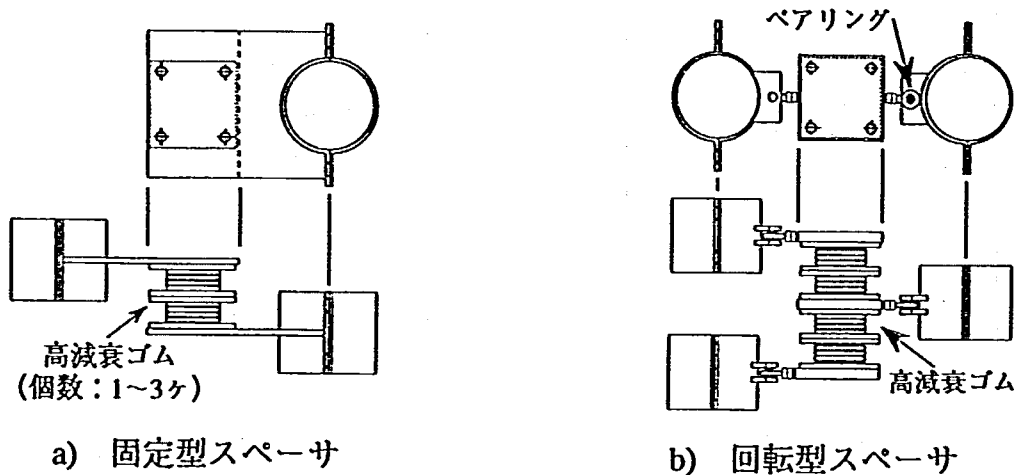


図-4.3.3.1 スペーサの構造図

表-4.3.3.1 高減衰ゴムの性能

スペーサの種類	ゴムの種類	バネ定数 (kgf/cm)	$\tan \delta$
固定型	$\phi 58 \times 1^*$	180	0.63
	$\phi 58 \times 2^*$	71	0.63
	$\phi 58 \times 3$	38	0.63
	$\phi 50 \times 1^*$	130	0.62
	$\phi 50 \times 2^*$	45	0.68
	$\phi 50 \times 3$	24	0.65
回転型	$\phi 58 \times 1 \times 1$	360	0.63
	$\phi 58 \times 2 \times 2$	142	0.63
	$\phi 50 \times 1 \times 1$	260	0.63
	$\phi 50 \times 2 \times 2$	90	0.63

*：実測値 他は推定値

(2) 実験パラメータと実験方法

実験のパラメータを表-4.3.3.2に示す。パラメータは、スパーサの種類、高減衰ゴムの性能、ケーブルの自由度、スパーサの取り付け位置と個数、振幅の大きさとした。ダミー鉄板は、固定型のスパーサの代わりに鉄板を挿入した場合を示している。

ケーブルの加振は、スパーサを所定の位置に取り付け、一方のケーブルを仮固定し、他方のケーブルをたわみ1次の固有振動数をメトロノームでリズムを取り所定振幅まで人力で加振した。2自由度の場合は、仮固定したケーブルを解放し自由振動させた。減衰自由振動の計測時間は60秒間とした。

表-4.3.3.2 実験のパラメータ

スパーサ	番号	ゴムの種類	自由度	取付位置	個数	振幅
固定型	1	φ58×1	2	1/2L	1	中振幅
	2	φ58×2	2	1/2L	1	中振幅
	3	φ58×3	2	1/2L	1	中振幅
	4	φ50×1	2	1/2L	1	中振幅
	5	φ50×2	2	1/2L	1	中振幅
	12	φ50×3	2	1/2L	1	中振幅
	7	φ50×2	2	1/2L	2	中振幅
	8	φ50×2	2	1/3L	1	中振幅
	9	φ50×2	2	1/3L	2	中振幅
	10	φ50×2	2	1/8L	1	中振幅
	11	φ50×2	2	1/8L	2	中振幅
	6	φ50×2	2	1/2L	1	大振幅
	13	φ50×3	2	1/2L	1	大振幅
	14	ダミー鉄板	2	1/2L	1	中振幅
	15	ダミー鉄板	2	1/3L	1	中振幅
	16	φ50×2	1	1/2L	1	中振幅
回転型	19	φ58×1×1	2	1/2L	1	中振幅
	20	φ58×1×1	2	1/2L	1	大振幅
	21	φ58×2×2	2	1/2L	1	中振幅
	22	φ58×2×2	2	1/2L	1	大振幅
	23	φ50×1×1	2	1/2L	1	中振幅
	24	φ50×1×1	2	1/2L	1	大振幅
	26	φ50×2×2	2	1/2L	1	中振幅
	27	φ50×2×2	2	1/2L	1	大振幅
	25	φ50×1×1	2	1/3L	1	中振幅
	32	φ50×1×1	1	1/2L	1	中振幅

(3) データの整理方法

減衰自由振動のデータを100ヶ/sec.でA.D.変換した。図-4.3.3.2に示すように、2本のケーブルの中央をそれぞれ1つの質点と想定し、それぞれの変位波形を加算および減算することにより同位相振動と逆位相振動に分解した。それぞれの波形にたいして、対数減衰率は1波毎の対数減衰率を移動平均($n=11$)することにより算出した。

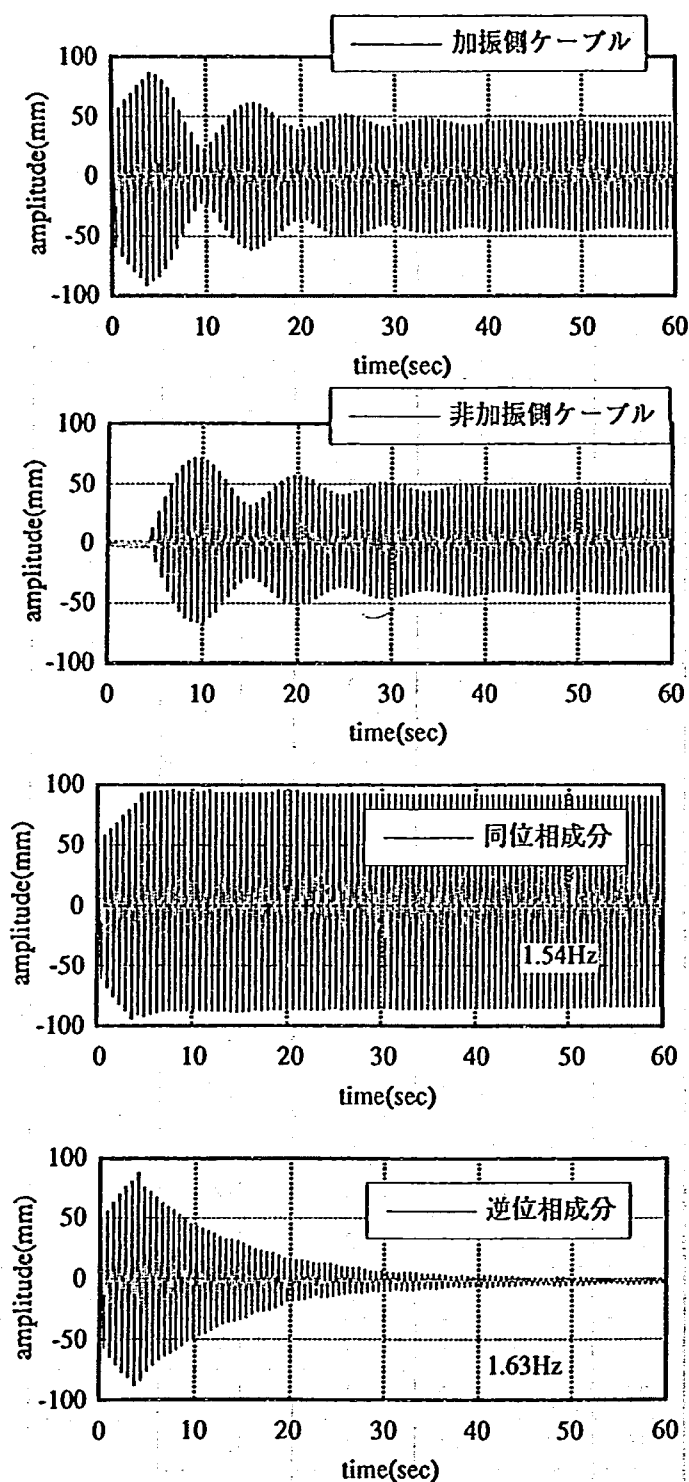


図-4.3.3.2 ケーブルの減衰自由振動の分離 (実験番号-13 の場合)

(4) 実験結果

実験結果の一覧を表-4.3.3.3に示す。表に示した値は、3回の試験結果の平均値である。固有振動数については、2自由度の2本のケーブルの同位相の振動成分はケーブルのたわみ振動の固有振動数 1.52Hz にほぼ一致している。逆位相の振動成分はスペーサを付加したことにより、固有振動数がスペーサのパネ剛性に従い増加している。スペーサの形式が固定型の場合は、回転型に比較して、逆位相の振動成分の固有振動数の増加が顕著である。

対数減衰率は、最大で平均0.067で、定性的にスペーサに付加する高減衰ゴムのパネ定数が小さいほど大きな減衰を得ている。また、減衰は振幅に対する依存性を有している。ダミー鉄板を用いたスペーサは、たわみ1次および2次モードが発生し、見かけ上の減衰率が一定しない。

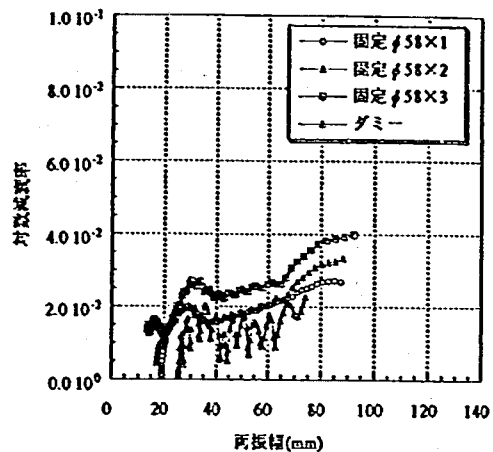
表-4.3.3.3 実験結果の一覧

実験 番号	固有振動数(Hz)		逆位相の両振幅 (mm) 時の対数減衰率															最大対数減衰率	平均
	同位相	逆位相	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	減衰率	振幅	減衰率
1	1.54	1.67							0.028	0.024	0.02	0.018	0.016	0.019	0.011		0.028	80	0.019
2	1.53	1.67							0.033	0.026	0.02	0.018	0.016	0.02	0.012		0.033	80	0.021
3	1.53	1.66						0.04	0.037	0.031	0.026	0.024	0.024	0.025	0.012		0.04	90	0.027
4	1.54	1.67				0.038	0.038	0.036	0.035	0.033	0.029	0.027	0.031	0.028	0.026		0.038	110	0.032
5	1.54	1.66		0.04	0.042	0.042	0.042	0.041	0.041	0.04	0.038	0.037	0.035	0.032	0.036	0.02	0.042	120	0.037
12	1.54	1.65			0.043	0.044	0.044	0.043	0.042	0.042	0.042	0.041	0.044	0.046	0.04	0.025	0.046	30	0.041
7	1.52	1.66							0.025	0.025	0.023	0.021	0.018	0.016			0.025	60	0.021
8	1.51	1.62							0.024	0.024	0.024	0.025	0.022	0.02	0.02	0.02	0.025	50	0.026
9	1.51	1.66										0.036	0.035	0.024	0.024	0.02	0.036	50	0.028
10	1.53	1.55						0.011	0.009	0.01	0.017	0.009					0.017	60	0.011
11	1.53	1.59					0.023	0.023	0.018	0.016	0.02	0.014	0.02	0.014			0.023	100	0.019
6	1.53	1.65		0.055	0.054	0.053	0.05	0.048	0.046	0.044	0.044	0.043	0.044	0.042	0.031		0.055	130	0.046
13	1.54	1.63		0.057	0.058	0.058	0.058	0.056	0.055	0.055	0.057	0.061	0.062	0.054	0.048	0.035	0.062	40	0.055
14	1.53	1.66								0.019	0.018	0.015	0.017	0.015			0.019	70	0.017
15	1.51	1.64						0.022	0.014	0.012	0.011	0.01	0.014	0.007			0.022	90	0.013
16	1.63	1.63							0.054	0.058	0.061	0.063	0.063	0.064	0.066	0.051	0.066	20	0.06
19	1.53	1.57								0.055	0.057	0.058	0.053	0.025	0.05	0.049	0.058	50	0.05
20	1.54	1.57					0.074	0.078	0.079	0.079	0.077	0.071	0.062	0.032	0.05		0.079	80	0.067
21	1.54	1.55							0.058	0.058	0.054	0.044	0.036	0.029	0.02	0.02	0.058	80	0.04
22	1.54	1.55	0.068	0.07	0.072	0.072	0.071	0.07	0.068	0.063	0.058	0.051	0.031	0.01			0.072	120	0.059
24	1.54	1.57			0.067	0.07	0.071	0.072	0.071	0.066	0.058	0.041	0.029	0.03	0.021	0.039	0.072	90	0.053
26	1.54	1.55		0.056	0.057	0.057	0.054	0.049	0.044	0.039	0.035	0.027	0.01	0.02	0.014		0.057	120	0.039
27	1.53	1.55		0.053	0.054	0.055	0.054	0.052	0.049	0.044	0.036	0.027	0.028	0.016	0.021		0.055	110	0.041
25	1.51	1.54							0.018	0.009	0.011	0.006	0.027	0.015			0.027	40	0.014
32	1.54	1.54								0.038	0.043	0.045	0.041	0.015	0.004		0.045	50	0.031

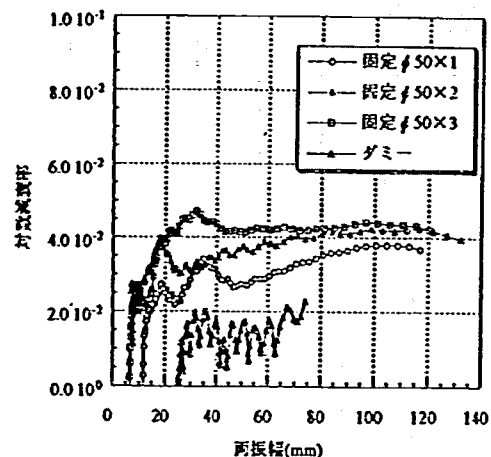
a) 高減衰ゴムの種類によるスペーサの減衰特性
図-4.3.3.3および図-4.3.3.4は、両ケーブルを自由として、各スペーサをケーブル中央に取り付けた場合を表している。図中のダミーは、固定型のスペーサの代わりに鉄板を挿入した場合を示している。

ダミーは、たわみ1次および2次モードが発生し、見かけ上の減衰率が一定しない。振動が減衰している原因は、ケーブルにねじり振動が生じ、ねじりモードの減衰が寄与しているためと考えられる。固定型のスペーサを用いた場合、バネ定数が減少するにつれて減衰性能が向上している。これは、スペーサのバネ定数が小さくなるに従い、ケーブルのねじり量が減少しスペーサの減衰機構が有効に作用するためと考えられる。この現象は3次元複素固有値解析でも確認されている。振幅が40mm以下になると、減衰率は低下を始める。この原因は高減衰ゴムの初期剛性に依存するものであるが、大きな振幅領域では粘性減衰を有する機能があることが理解できる。

回転型スペーサは、高減衰ゴムのねじり、および、ケーブルのねじり振動の影響を極力排除する目的で作成したものである（しかし、ケーブル半径分の偶力を発生させる構造になっている）。大振幅領域では同一のバネ定数を有する固定型スペーサと比較すると大きな減衰を得ているが、振幅に対する依存性が高い。この原因は、回転型が純粋なせん断変形による減衰が生じているが、振幅の減少と共に初期剛性により変形が小さくなるためである。一方、固定型の高減衰ゴムの減衰機構は、せん断変形のみではなくねじり変形による減衰機構が作用していると考えられる。



b) φ58の高減衰ゴム使用



a) φ50の高減衰ゴム使用

図-4.3.3.3 固定型スペーサの減衰特性

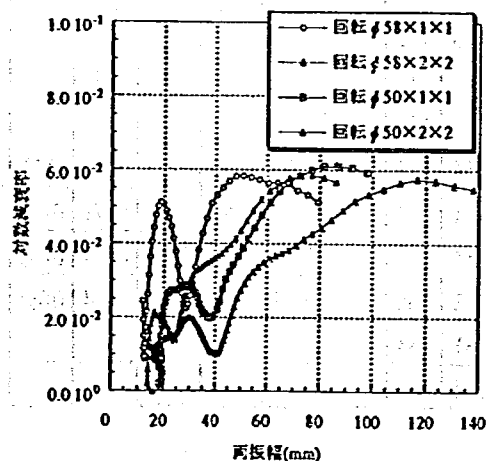


図-4.3.3.4 回転型スペーサの減衰特性

b) 初期振幅に対する減衰特性

両ケーブルを自由として各スペーサをケーブル中央に取り付けた場合の初期振幅に対する減衰特性を図-4.3.3.5に示す。初期に大きな振幅を与えた場合、減衰率は比較的大きくなるが、その振幅依存性に大きな相違はない。この原因は、高減衰ゴムの減衰特性が最近に受けた変位に依存するためである。

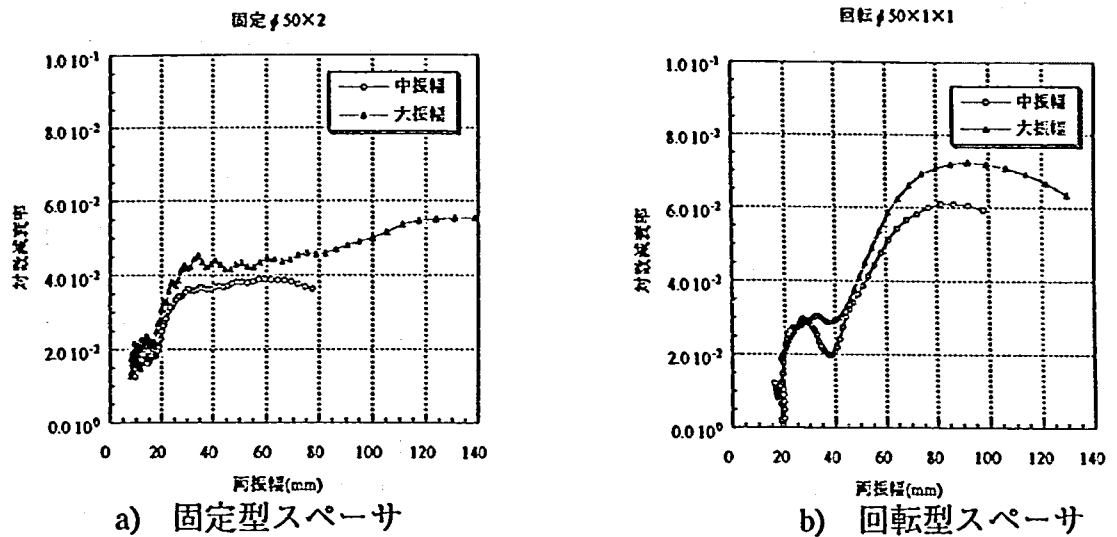


図-4.3.3.5 初期振幅に対する減衰特性

c) ケーブルの自由度に対する減衰特性

各スペーサをケーブル中央に取り付け、両ケーブルを自由とした場合（2自由度）と片側ケーブルの全自由度を固定した場合（1自由度）の比較を図-4.3.3.6に示す。固定型スペーサでは、片側ケーブルのたわみに対する拘束は逆位相振動を想定する場合考慮する必要はないが、片側ケーブルのねじりに対する拘束はスペーサの減衰機構の上で重要な役割を果たしていることが理解できる。回転型スペーサでは、ねじり拘束の影響が少ないので、振幅に依存した減衰特性が現れている。

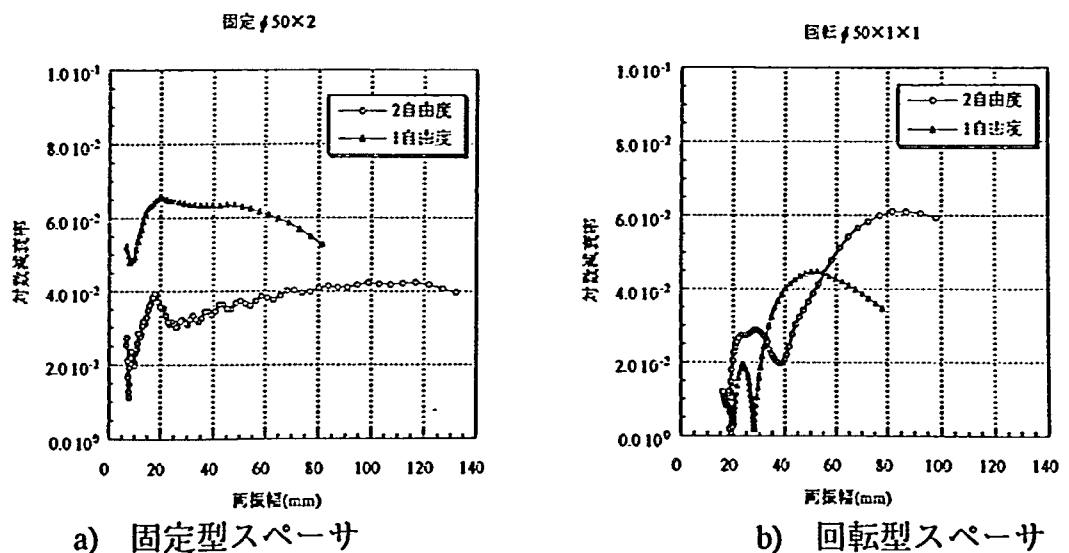


図-4.3.3.6 ケーブルの自由度に対する減衰特性

d) ケーブルの取り付け位置と個数による減衰特性

スペーサの取り付け位置と個数による減衰特性を図-4.3.3.7に示す。1ヶの固定型スペーサ $\phi 50 \times 2$ を用いた場合、ケーブルの1/2点から1/3点、1/8点に移動するに従い、スペーサの減衰性能は低下する。また、2ヶの固定型スペーサ $\phi 50 \times 2$ をケーブル中央に対し対称に設置した場合、1ヶの場合に比較し減衰性能はその設置位置により減衰性能が増減する。

この原因は、スペーサの剛性と設置位置のケーブル剛性などにより、高減衰ゴムの減衰性能の作用が異なるためと思われる。今後、数値解析により定量的に評価する必要がある。

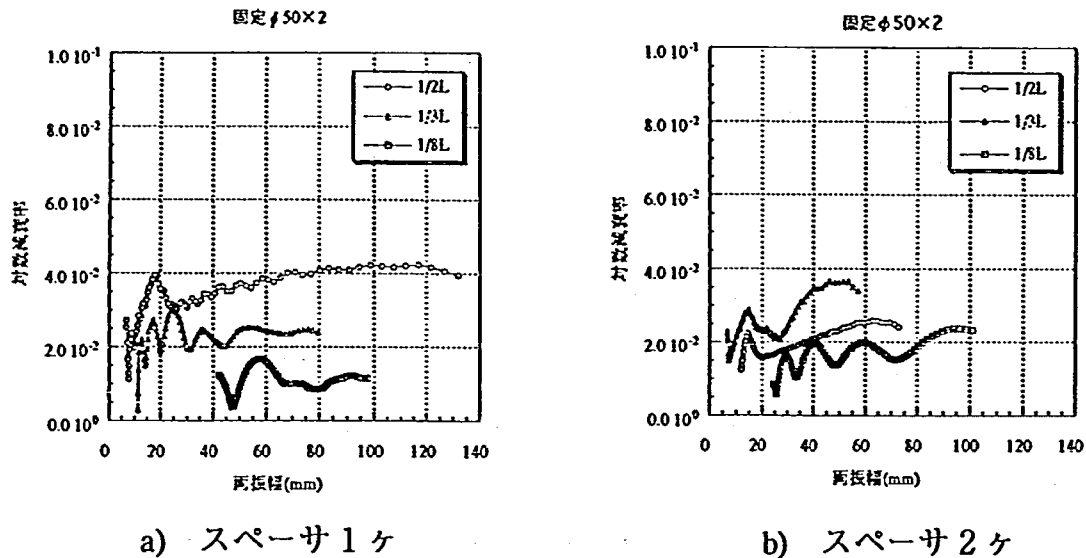


図-4.3.3.7 スペーサの取り付け位置と個数による減衰特性

4.3.4. 高減衰ゴムを用いたスペーサー（その2）

(1) スペーサーの形状

実験に用いたスペーサーは、図-4.3.4.1に示すような2本のケーブルの相対変位に対して高減衰ゴムのせん断変形で減衰を与えるものであり、その形状は図-4.3.4.2に示す通りである。

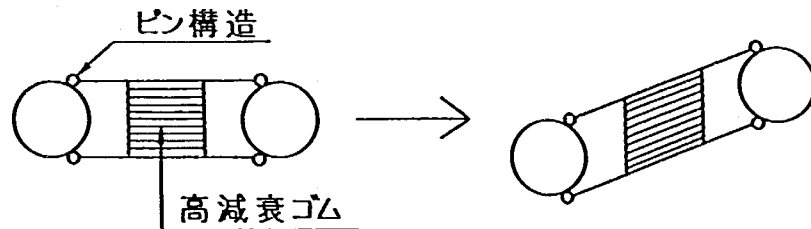


図-4.3.4.1 スペーサー概念図

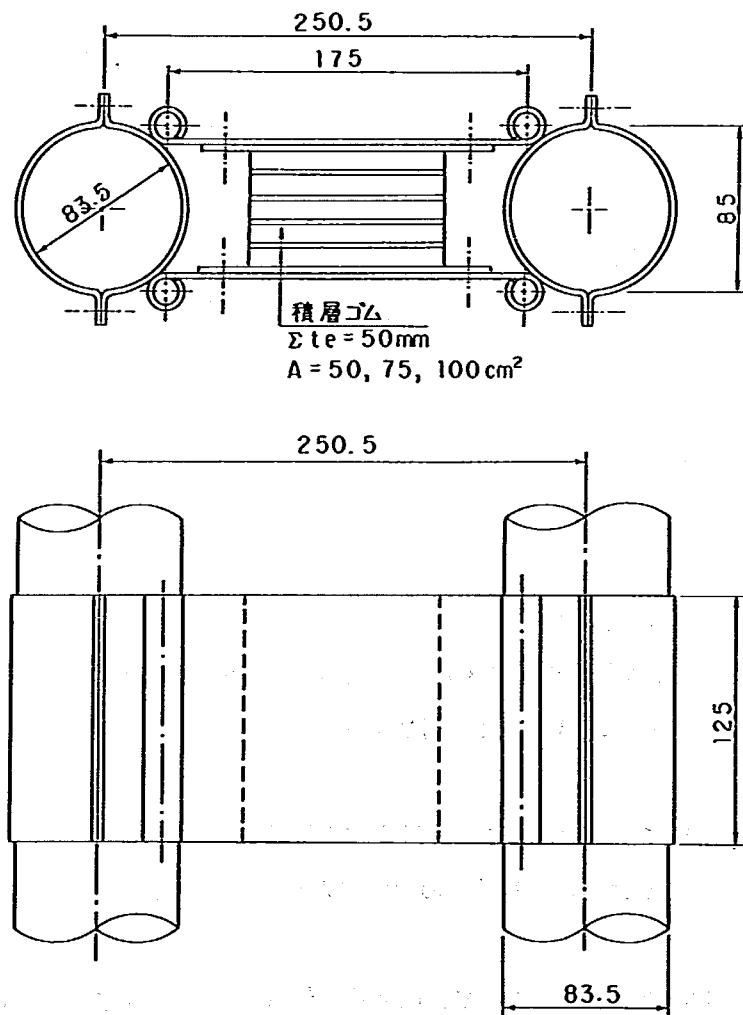


図-4.3.4.2 スペーサー形状図

(2) 実験ケース

実験ケースを表-4.3.4.1に示す。実験は各ケース2回ずつ行った。

表-4.3.4.1 実験ケース

実験 ケース	ケーブル自由度		スパー位置	減衰特性 A (cm ²)
	ケーブル1	ケーブル2		
1	固定	自由	1/2L	なし
2	固定	自由	1/2L	100
3	固定	自由	1/2L	75
4	固定	自由	1/2L	50
5	自由	自由	1/2L	なし
6	自由	自由	1/2L	100
7	自由	自由	1/2L	75
8	自由	自由	1/2L	50
9	固定	自由	1/8L	なし
10	固定	自由	1/8L	100
11	固定	自由	1/8L	75
12	固定	自由	1/8L	50
13	自由	自由	1/8L	なし
14	自由	自由	1/8L	100
15	自由	自由	1/8L	75
16	自由	自由	1/8L	50

(3) 高減衰ゴムの特性

実験に用いた高減衰ゴムの特性を以下に示す。

1) 復元力特性

加振周波数0.2Hz、雰囲気温度20℃の条件下での高減衰ゴムの履歴ループを図-4.3.4.3に示す。また、せん断弾性率Gのひずみ依存性を図-4.3.4.4に、減衰定数tan δのひずみ依存性を図-4.3.4.5にそれぞれ示す。なお、変形後の特性については200%ひずみ経験後の特性である。

2) 温度依存性

温度依存性を図-4.3.4.6に示す。ここで、温度補正係数CTは、各温度におけるせん断弾性率Gと減衰定数tan δの特性を、20℃における特性との比率で表したものである。

3) 速度依存性

速度依存性を図-4.3.4.7に示す。ここで、速度補正係数Cfは、各加振周波数におけるせん断弾性率Gと減衰定数tan δの特性を、0.2Hzにおける特性との比率で表したものである。

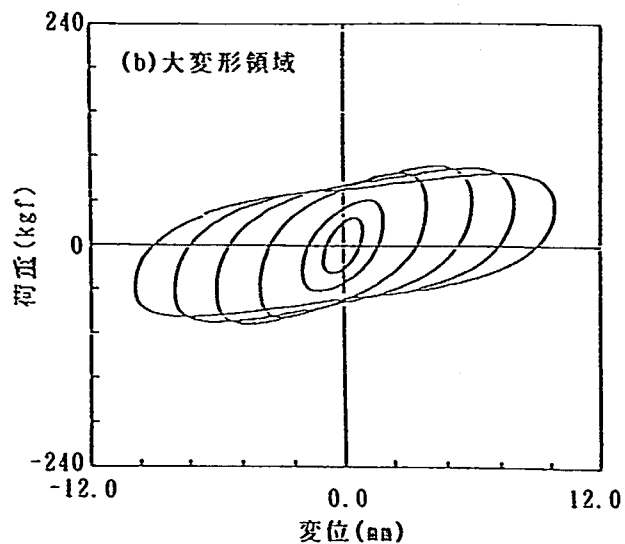
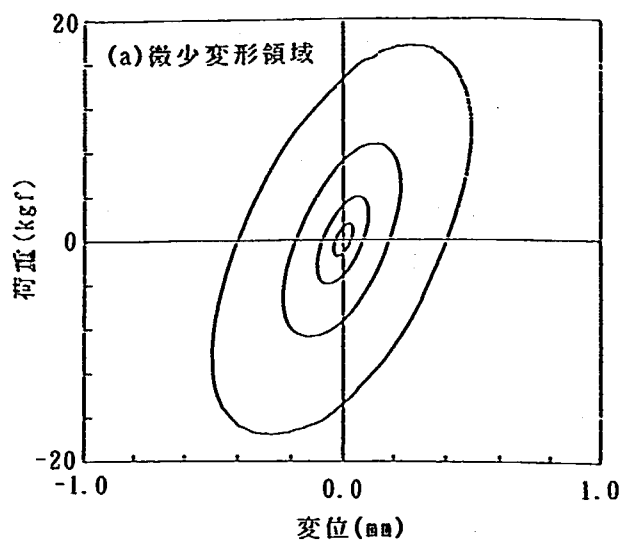


図-4.3.4.3 高減衰ゴムの履歴ループ

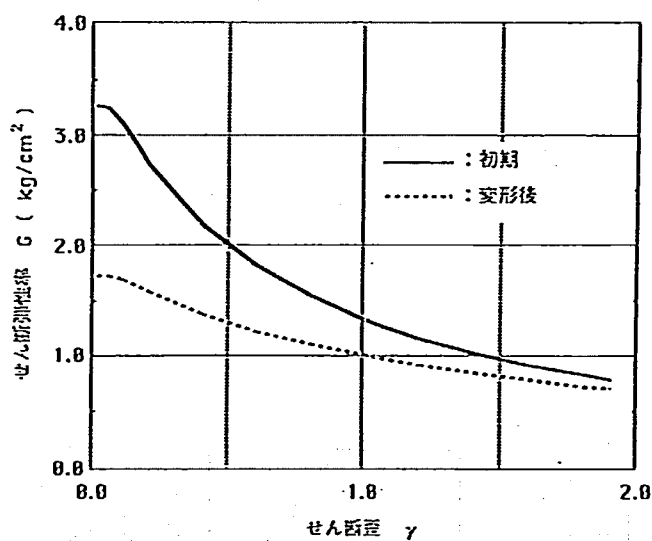


図-4.3.4.4 セン断弾性率Gのひずみ依存性

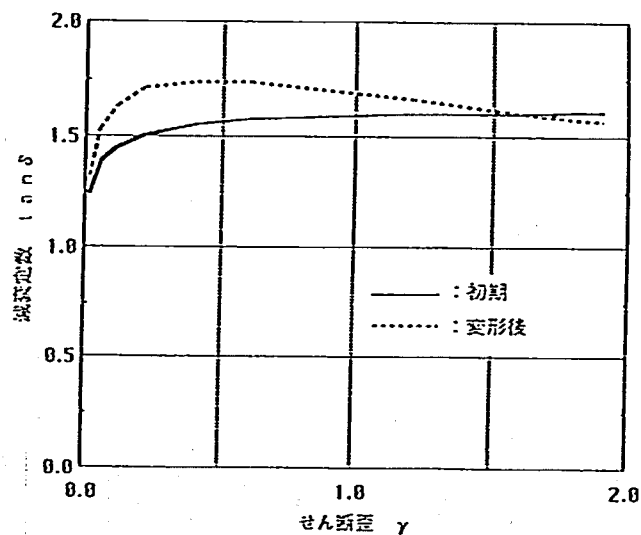


図-4.3.4.5 減衰定数 $\tan \delta$ のひずみ依存性

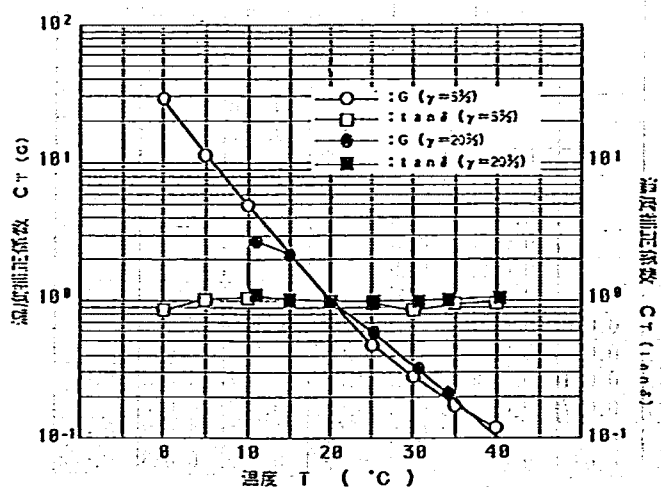


図-4.3.4.6 Gおよび $\tan \delta$ の温度依存性

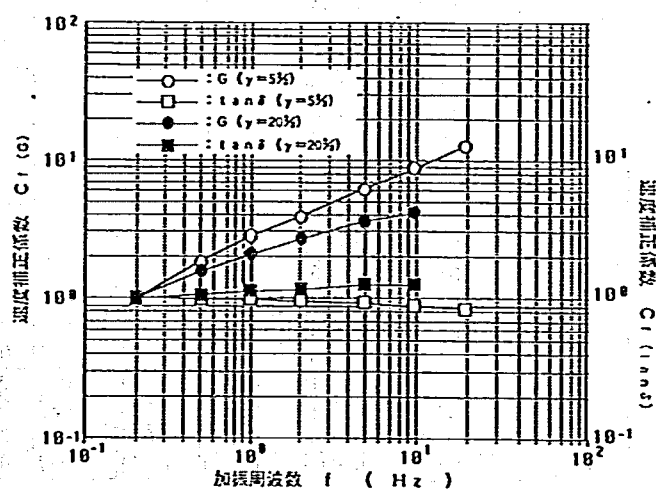


図-4.3.4.7 Gおよび $\tan \delta$ の速度依存性

(4) 実験結果

図-4.3.4.8に、実験により得られたケーブルの変位波形の例を示す。実験ケース4は片側のケーブルを固定し、スパーサーを1/2 L点に取り付けた実験である。また、実験ケース8は2本のケーブルを自由とし、スパーサーを1/2 L点に取り付けた実験であり、図には両ケーブルの振動波形を示してある。2本のケーブルの間を振動エネルギーが往復している様子がわかる。同図には、2本のケーブルの変位波形の差を取り、両ケーブルの相対変位成分を取り出したものも示しているが、相対変位波形は粘性減衰的な特性を示している。

表-4.3.4.2に、実験により得られた振幅に対する対数減衰率の一覧を示す。ここで、最大振幅は、ケーブル中央位置でのケーブル間相対変位振幅を示す。なお、減衰ゴムの無いスパーサーのみの実験ケース(1, 5, 9, 13)では波形が乱れており、減衰率を求めることができなかった。対数減衰率は片側ケーブル固定の実験ではケーブル中央の変位波形から、両ケーブル自由の実験ではケーブル中央での2本のケーブルの変位の差として得られる相対変位波形から求めている。また、対数減衰率の平均値として示したものは、全ての波を用いて減衰率を求めたものであり、各振幅ごとの対数減衰率はその変位振幅前後の5波を用いて求めたものである。この表よりわかるように、このタイプのスパーサーでは減衰性能はケーブルの変位量にはほとんど依存していない。

図-4.3.4.9には、ゴムせん断断面積と対数減衰率との関係を示す。ここでの対数減衰率は平均値を用いている。同図より、両ケーブルを自由とした場合には、片側ケーブルを固定とした場合に比べてかなり減衰性能が落ちることがわかる。

表-4.3.4.2 実験結果一覧表

実験ケース	最大振幅 (mm)	対数減衰率 δ											
		平均	最大振幅時	1.0D	0.9D	0.8D	0.7D	0.6D	0.5D	0.4D	0.3D	0.2D	0.1D
2-1	25.7	0.264	0.280								0.280	0.280	0.268
2-2	25.0	0.255	0.261									0.261	0.266
3-1	26.6	0.280	0.283								0.283	0.283	0.274
3-2	29.4	0.277	0.295								0.295	0.295	0.263
4-1	32.5	0.246	0.242								0.242	0.261	0.261
4-2	31.8	0.259	0.257								0.257	0.273	0.258
6-1	48.4	0.048	0.045						0.043	0.048	0.053	0.048	0.056
6-2	44.3	0.047	0.044						0.044	0.050	0.052	0.047	
7-1	41.9	0.066	0.068						0.068	0.066	0.067	0.068	
7-2	42.3	0.065	0.070						0.070	0.069	0.062	0.071	
8-1	36.3	0.088	0.082							0.082	0.086		
8-2	45.0	0.083	0.084						0.084	0.084	0.089		
10-1	50.5	0.067	0.068					0.068	0.069	0.066			
10-2	43.8	0.067	0.069						0.069	0.069	0.062		
11-1	50.9	0.059	0.060					0.060	0.060	0.056			
11-2	52.5	0.057	0.058					0.058	0.057				
12-1	57.7	0.045	0.046					0.046	0.043				
12-2	53.9	0.047	0.047					0.047	0.047				
14-1	89.8	0.024	0.028	0.028	0.027	0.025	0.026	0.028	0.022	0.023	0.026	0.027	
14-2	91.0	0.025	0.027	0.027	0.031	0.025	0.028	0.026	0.024	0.024	0.026	0.023	
15-1	105.7	0.031	0.031	0.035	0.035	0.031	0.031	0.029	0.031	0.030	0.031	0.032	0.033
15-2	98.8	0.031	0.034	0.035	0.035	0.034	0.027	0.033	0.030	0.031	0.034	0.032	
16-1	90.3	0.036	0.036	0.036	0.035	0.037	0.037	0.035	0.037	0.037	0.035	0.028	0.038
16-2	98.9	0.036	0.039	0.034	0.037	0.036	0.037	0.037	0.037	0.037	0.036	0.033	0.033

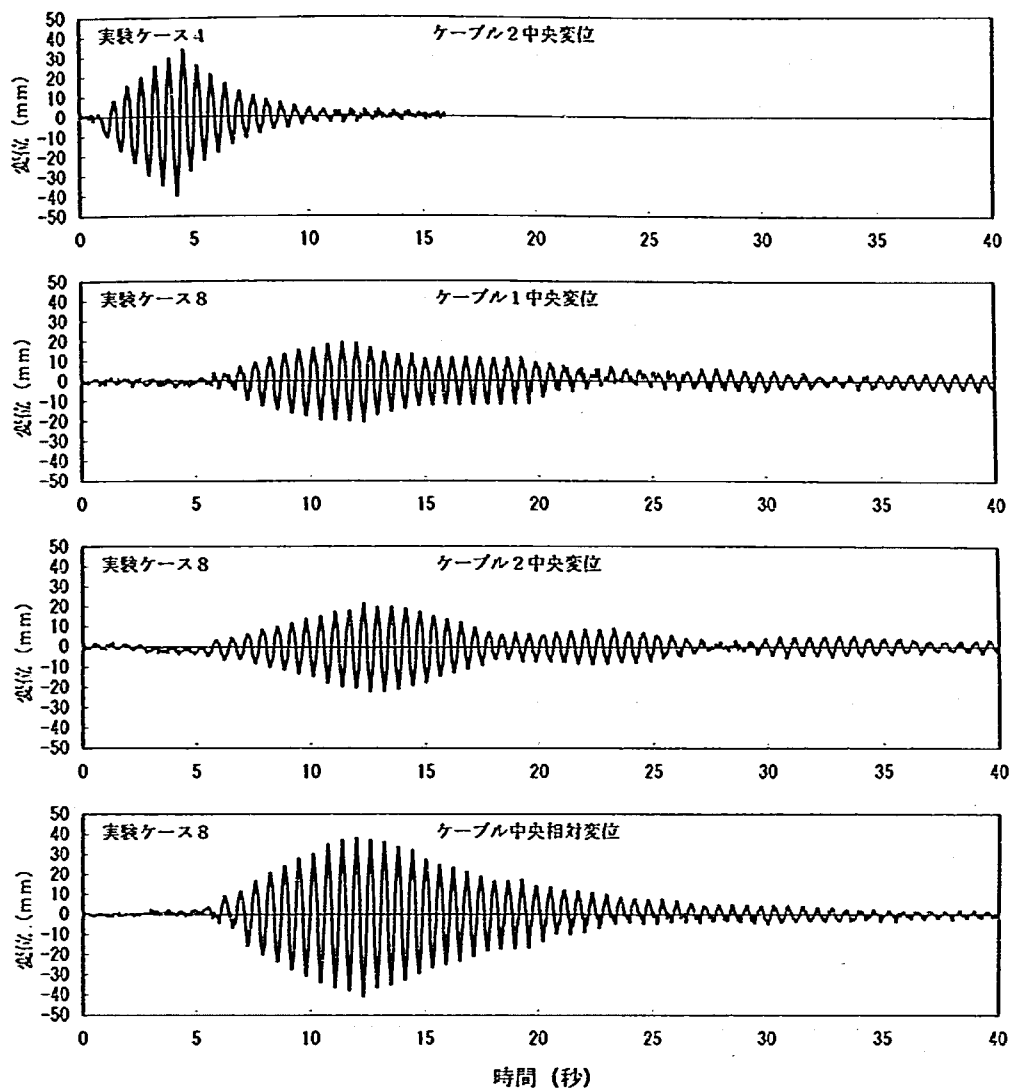


図-4.3.4.8 実験の変位振幅波形の例

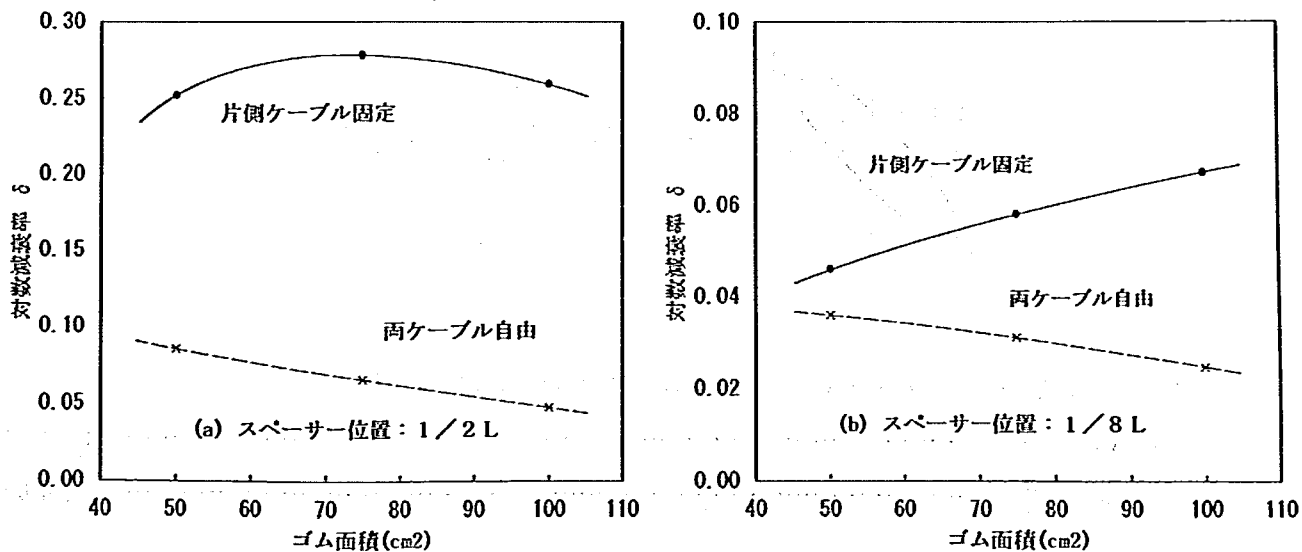


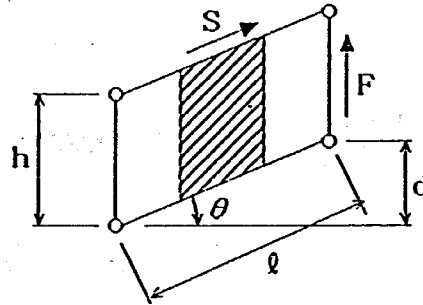
図-4.3.4.9 ゴムせん断断面積～対数減衰率関係図

(5) 解析

解析はケーブルの張力による幾何剛性を考慮した複素固有値解析によった。

1) 減衰機能付きスペーサーのモデル化

荷重～変位関係



力の釣り合い式

$$S = \frac{l}{h} F \quad \dots\dots\dots (4.3.4.1)$$

変位～ひずみ関係式

$$y = \frac{h \cdot \sin \theta}{\Sigma l_c} = \frac{h}{\Sigma l_c} \cdot \frac{d}{l} \quad \dots\dots\dots (4.3.4.2)$$

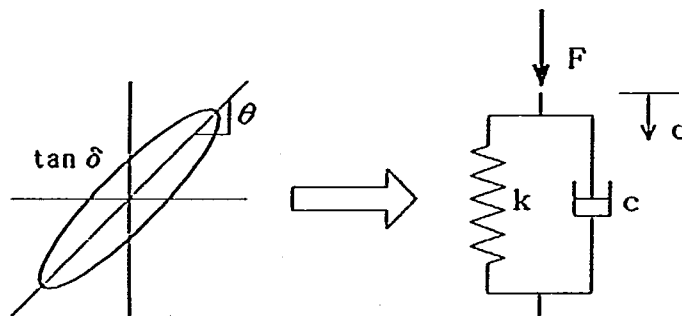
力～ひずみ関係式

$$S = GA_y \quad \dots\dots\dots (4.3.4.3)$$

以上より

$$F = \frac{GA}{\Sigma l_c} \left(\frac{h}{l} \right)^2 d \quad \dots\dots\dots (4.3.4.4)$$

等価なバネーダッシュポットモデル



粘弾性体と等価なバネーダッシュポットモデルの関係式は次式で表される。

$$G = \sqrt{k^2 + (c\omega)^2} \quad \dots\dots\dots (4.3.4.5)$$

$$\eta = \tan \delta = \frac{c\omega}{k} \quad \dots\dots\dots (4.3.4.6)$$

ここに、 ω : 円振動数 ($= 2 \pi f$)

これら 2 式より、バネ定数及び減衰定数はそれぞれ次式となる。

$$k = \frac{G}{\sqrt{1 + \tan^2 \delta}} \dots\dots\dots (4.3.4.7)$$

$$C = \frac{G \tan \delta}{\omega \sqrt{1 + \tan^2 \delta}} \dots\dots\dots (4.3.4.8)$$

2) 解析条件

① ケーブル

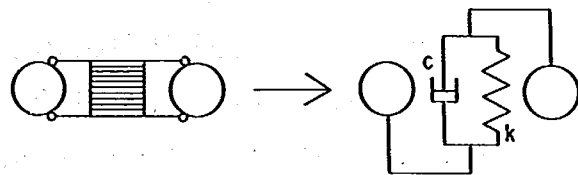
長さ	98.43m
張力	165tf
固有振動数	1.52Hz
直径	83.5mm
ケーブル間隔	250.5mm
単位長さ当たり質量	$1.891 \times 10^{-3} \text{ t/m}$
単位長さ当たり回転慣性質量	$1.041 \times 10^{-6} \text{ t} \cdot \text{m}^2 / \text{m}$
ねじり剛性	$0.511 \text{ tf} \cdot \text{m}^2$ (静的ねじり試験から求めた)
曲げ剛性	考慮しない

② スペースー

振動数	1.52Hz (ケーブルの固有振動数とした)
温度	23 °C (実験時の温度測定による)
せん断ひずみ	40.56% (ケーブル変位振幅を0.5Dとした)
ゴム層厚	$\Sigma t_e = 5 \text{ cm}$
高さ幅比	$\frac{h}{l} = \frac{85}{175} = 0.486$
ゴムせん断断面積	$A = 50, 75, 100 \text{ cm}^2$

下表に上記条件で計算したスペースーのバネ定数及び減衰定数の値を示す。

ゴムせん断断面積 A cm^2	バネ定数 k tf/m	減衰定数 c tf·sec/m
100	1.2892	0.1919
75	0.9669	0.1439
50	0.6446	0.0959



③解析モデル

解析に用いたモデルを図-4.3.4.10に示す。モデルはそれぞれ32等分割された2本のケーブルとそれらをつなぐスペーサー要素より構成される。片側ケーブル固定の場合には、ケーブルの1本の自由度をすべて拘束する。また、ケーブルのねじれ変形の影響を考慮するため、図-4.3.4.11に示すように、スペーサー要素は剛体要素を介してケーブルに接続している。

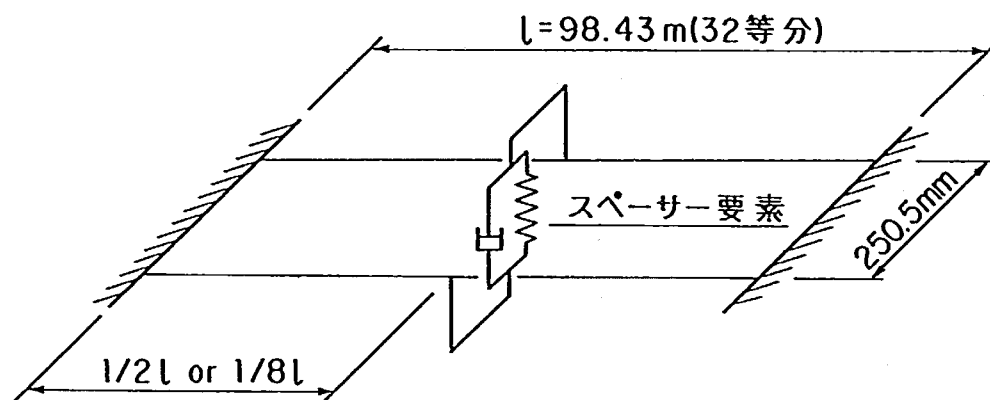


図-4.3.4.10 解析モデル

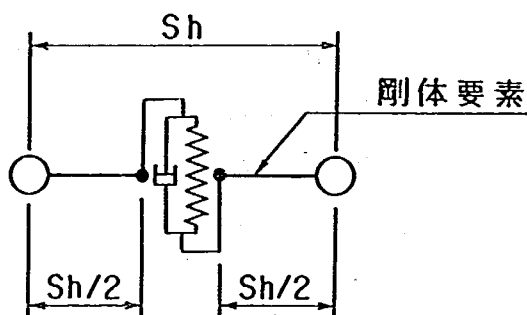


図-4.3.4.11 スペーサー要素取り付け部詳細

3) 解析結果

図-4.3.4.12(a)～(d)に、解析により得られたゴムせん断断面積と対数減衰率の関係を実験結果と比較して示す。ここで、実験結果は対数減衰率の平均値である。同図(a)のスペーサー位置 $1/2 L$ 、片側ケーブル固定の結果を見ると、複素固有値解析による対数減衰率の値が実験結果よりかなり大きくなっており、この傾向はスペーサーのゴム面積が大きくなるほど強くなっている。程度の差はあるが同様のことが図(c)に示すスペーサー位置 $1/8 L$ の場合にも見られる。これは、固定側のケーブルの固定度が不完全であったためと考えられる。実際に、実験時にはケーブル固定治具の変形が観測された。図(b)、図(d)に示す両ケーブル自由の実験では、複素固有値解析結果は実験結果と良く一致している。

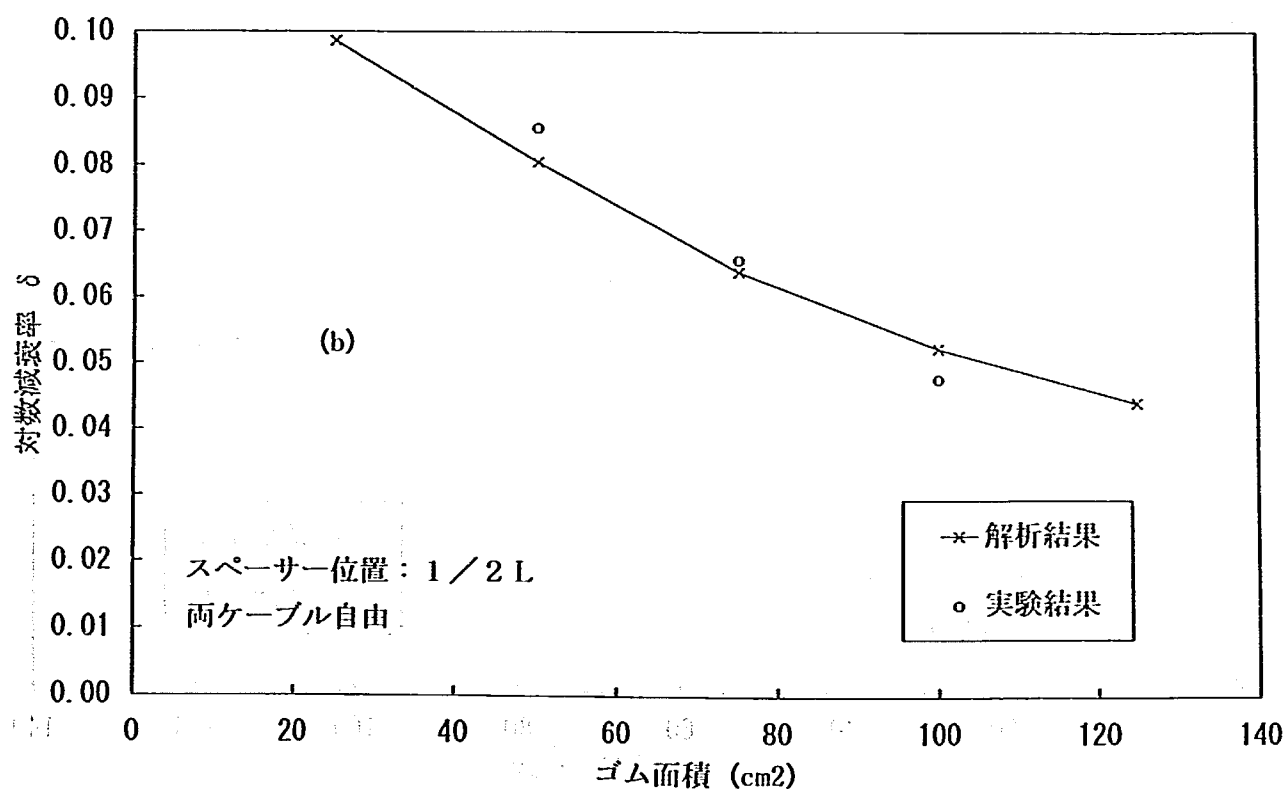
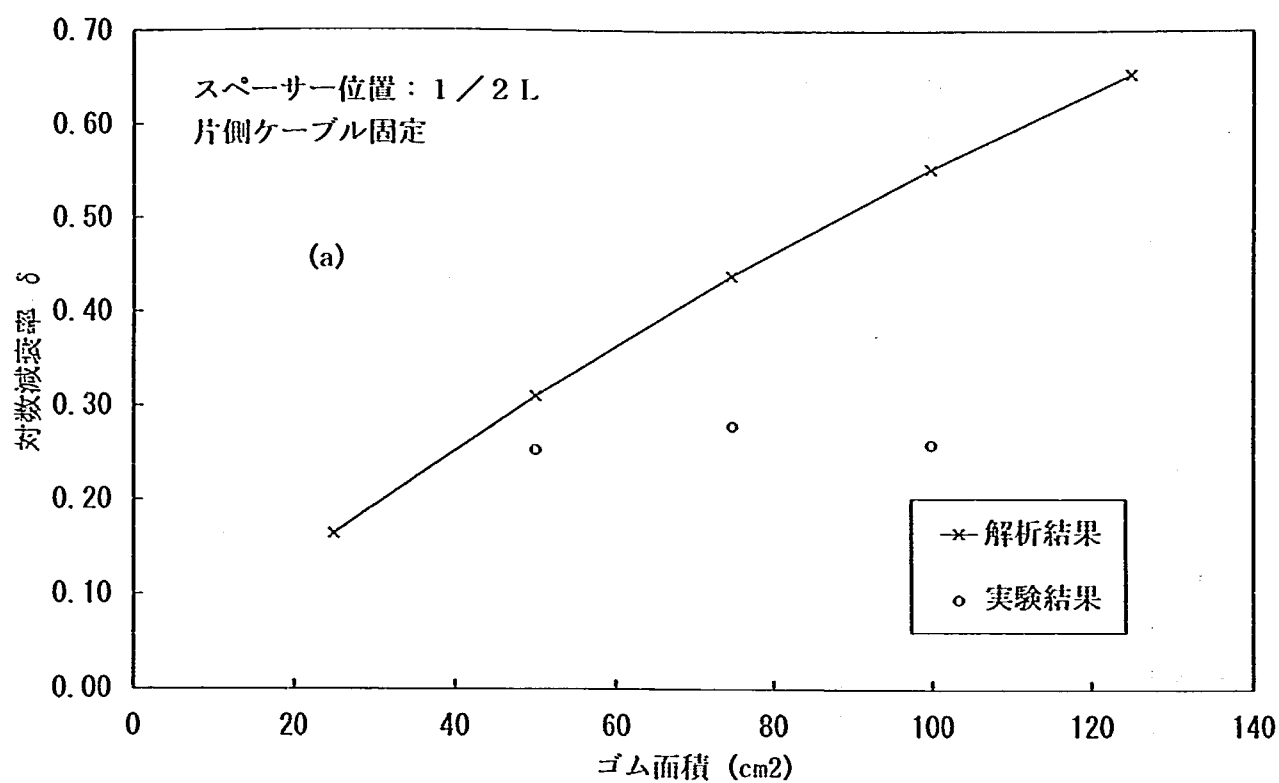


図-4.3.4.12 ゴムせん断断面積～対数減衰率関係図 (その1)

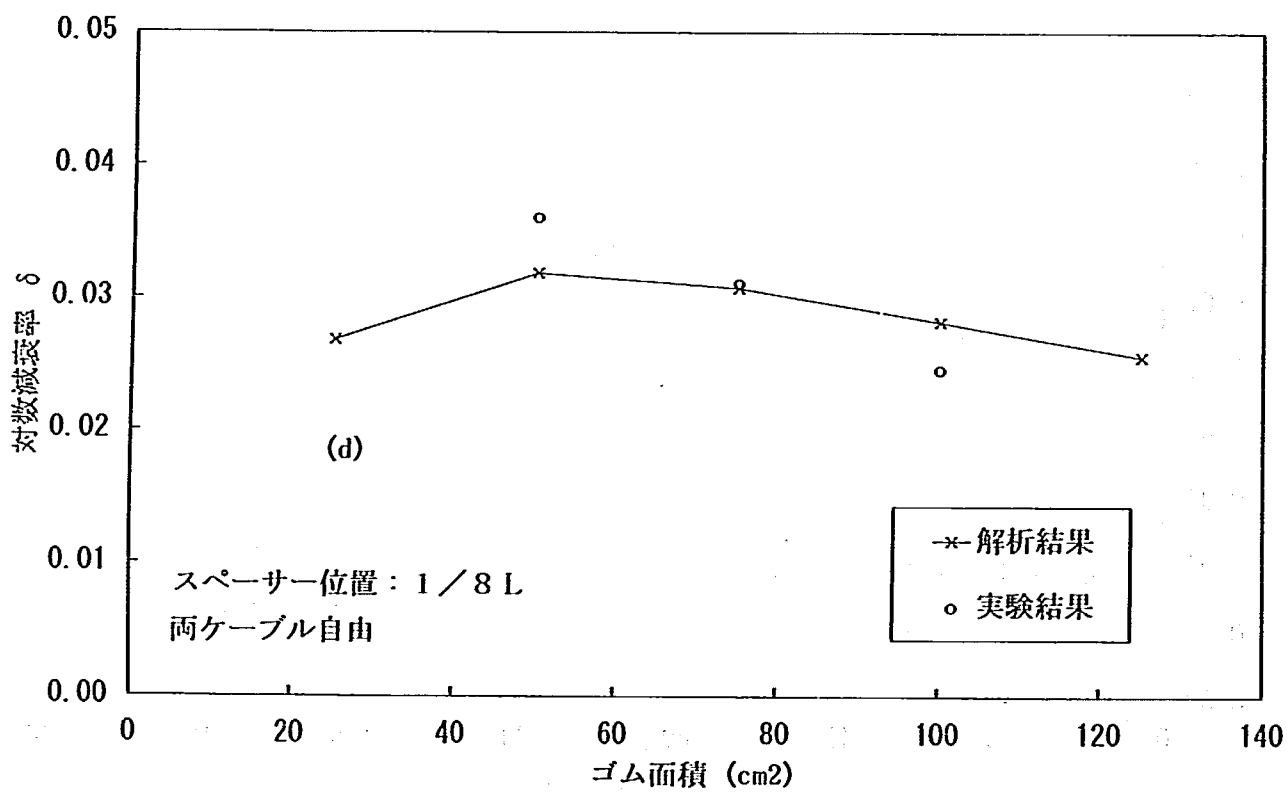
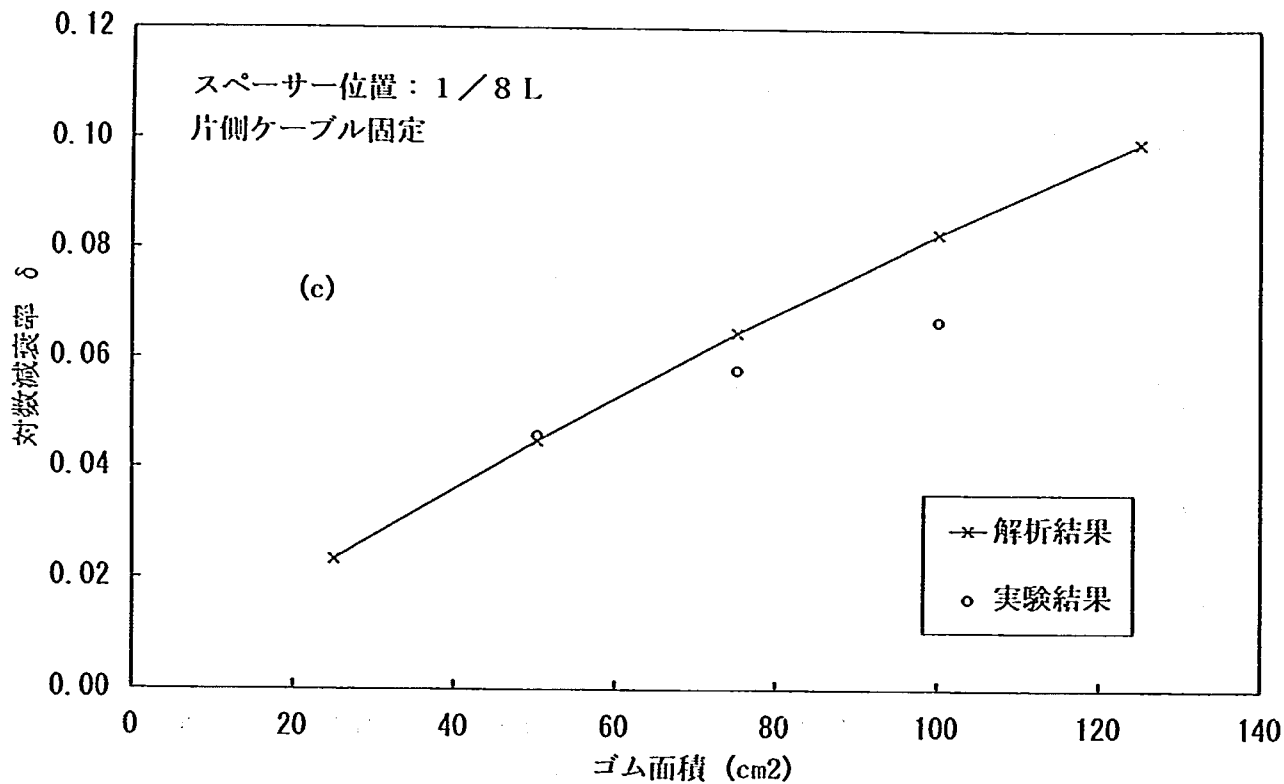


図-4.3.4.12 ゴムせん断断面積～対数減衰率関係図（その2）

4.3.5 高減衰ゴムを用いたスペーサ（その3）

(1) ねじれ減衰スペーサの模型実験

1) ねじれ減衰スペーサ諸元

実験に使用したねじれ減衰スペーサを写真-4.3.5.1に示す。並列2斜材に鉛直相対変位が生じた時、スペーサ治具と斜材表面に上下面を付着させた減衰デバイスには必然的にせん断変形が生じる。本スペーサは、この変形に伴い発生する履歴減衰で斜材の減衰性能を高めようと工夫したものである。

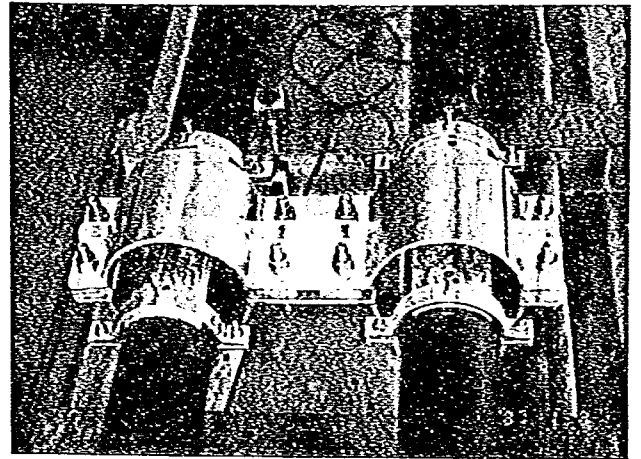


写真-4.3.5.1 ねじれ減衰スペーサ

実験では減衰デバイスとして、ブリヂストンの高減衰ゴムKL301を使用した。これはせん断バネ係数が最も小さい製品となっている。なお、せん断バネ係数がさらに小さいKL201の製品化が予定されている。高減衰ゴムの減衰特性を表-4.3.5.1に示す。

実験ではスペーサ片側当たり、縦5cm、幅2.5cm、厚さ3cmの高減衰ゴムKL301を2個使用した。円周方向の最大変形を実験に一致させて $D_{\theta \max} = 4.5\text{cm}$ とする。ねじれ減衰スペーサ実験モデルを図-4.3.5.1に示す。スペーサ片側当たりの履歴特性値は下記となり、履歴特性は図-4.3.5.2に示すバイリニア型となる。

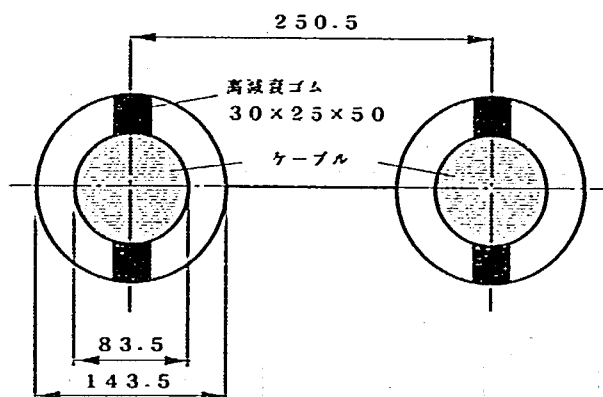
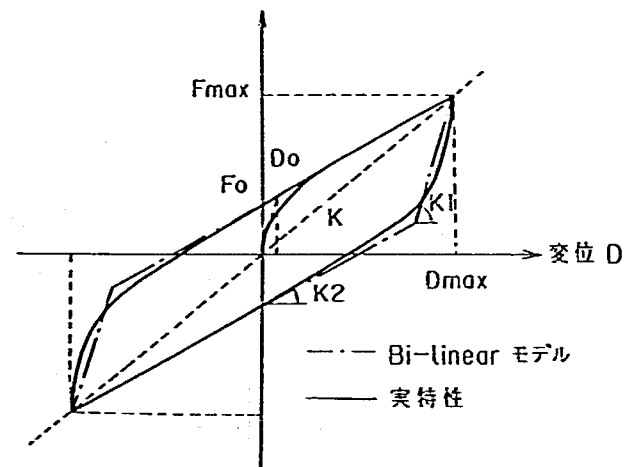


図-4.3.5.1 ねじれ減衰スペーサ実験モデル



降伏変形:	$D_{\theta 0} =$	0.46cm
1次剛性:	$K_{\theta 1} =$	102.56kgf/cm
2次剛性:	$K_{\theta 2} =$	21.85kgf/cm
等価剛性:	$K_{\theta} =$	30.18kgf/cm

図-4.3.5.2 履歴特性

表-4.3.5.1 高減衰ゴムの減衰特性

等価せん断弾性係数 : $G_d = a_0 + a_1\gamma + a_2\gamma^2 + a_3\gamma^3 + a_4\gamma^4 + a_5\gamma^5$ 等価減衰定数 : $h_{eq} = b_0 + b_1\gamma + b_2\gamma^2 + b_3\gamma^3$ 等価荷重特性値 : $u = c_0 + c_1\gamma + c_2\gamma^2 + c_3\gamma^3$ γ : せん断ひずみ

材料：KL301							
項目	適用領域	定 数					
		a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
G _d	0.1 ≤ γ ≤ 1.5	14.37	-27.95	30.57	-15.53	2.925	0.0
	1.5 ≤ γ ≤ 3.0	7.897	-5.427	2.366	-0.4935	0.04300	0.0
	γ = 1.5 : G _d = 3.632 (kgf/cm ²)						
項目	適用領域	定 数					
		b ₀		b ₁	b ₂		b ₃
h _{eq}	0.1 ≤ γ ≤ 3.0	0.401		0.002580	-0.0008144		-0.001110
	γ = 1.5 : h _{eq} = 0.157						
項目	適用領域	定 数					
		c ₀		c ₁	c ₂		c ₃
u	0.1 ≤ γ ≤ 3.0	0.3071		-0.009267	-0.008038		0.0002147
	γ = 1.5 : u = 0.276						

材料：KL201							
項目	適用領域	定 数					
		a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
G _d	0.1 ≤ γ ≤ 1.5	7.62	-11.70	10.02	-3.96	0.825	0.0
	γ = 1.5 : G _d = 2.53 (kgf/cm ²)						
項目	適用領域	定 数					
		b ₀	b ₁	b ₂	b ₃		
h _{eq}	0.1 ≤ γ ≤ 1.5	0.1592	-0.2430	0.1730	-0.0523		
	γ = 1.5 : h _{eq} = 0.12						
項目	適用領域	定 数					
		c ₀	c ₁	c ₂	c ₃		
u	0.1 ≤ γ ≤ 1.5	0.4104	-0.2380	0.1660	-0.0560		
	γ = 1.5 : u = 0.24						

2) 実験方法

プレテンション桁製作用反力台に長さ100mの斜張橋ケーブル2本を並列に張り、これに減衰スペーサを取り付け、実寸レベルの性能確認実験を行った。ケーブルには1本当たり165tfの張力が導入されている。ケーブル重量は18.53kgf/m、ケーブル径は83.5mm、ケーブル間隔はケーブル径の3倍で250.5mmである。ケーブル単体の振動実験で振動数1.54Hzが計測され、これと導入張力よりケーブル振動長98.43mを計算した。ケーブル諸元を表-4.3.5.2に示す。実験状況を写真-4.3.5.2に示す。

表-4.3.5.2 ケーブル諸元

種 別	F 3 6 0 t
ケーブル長	1 0 0 . 0 0 m
振 動 長	9 8 . 4 3 m
ケーブル張力	1 6 5 t f
測定振動数	1 . 5 4 H z
ケーブル径	8 3 . 5 m m
ケーブル間隔	2 5 0 . 5 m m
ケーブル重量	1 8 . 5 3 k g f / m

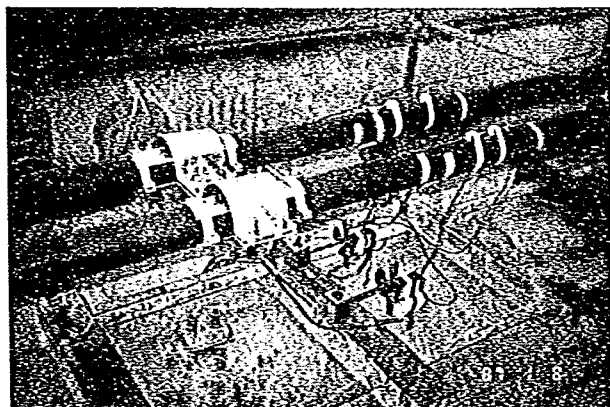


写真-4.3.5.2 実験状況

3) 実験結果

並列ケーブルの長さ方向中央位置にねじれ減衰スペーサー1体を取り付けて行った実験ケースについて報告する。固有周期に合わせたタイミングで、並列2ケーブルを交互に下方向に加力して1次の逆対称モードを起振し、その後の自由減衰を観察した。なお、データサンプリングは0.01秒で行い、加力は1人で行った。

スペーサ取り付け位置で計測した2ケーブルの変位波形、その相対変位波形の1例を図-4.3.5.3に示す。相対変位波形のフーリエスペクトルから次式を用いて対数減衰率 δ を計算した。式中のF1、F2は、128個の変位データ群を取り込みFFT解析で求めたフーリエスペクトル値を、着目周波数を中心とする3つを平均した値で、それらの変位データ群は互いに1周期隔たっている。

$$\delta = \text{LOG.} (F1 / F2)$$

3記録から計算した対数減衰率を図-4.3.5.4に示す。実験記録から計算した対数減衰率は6%～8%であった。なお、ケーブル単体の振動実験で1次の固有振動数として1.54Hz、斜材の構造減衰として対数減衰率で1%が測定されており、図-4.3.5.4は構造減衰1%を含んだ値となっている。

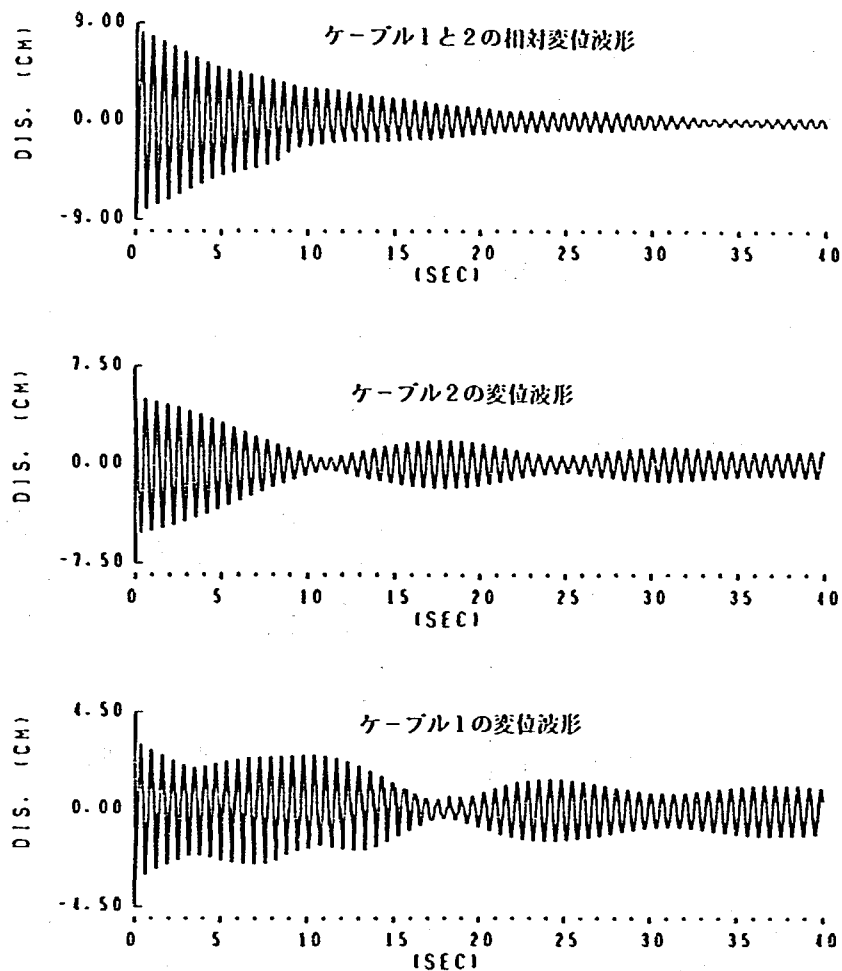


図-4.3.5.3 変位波形及び相対変位波形の1例

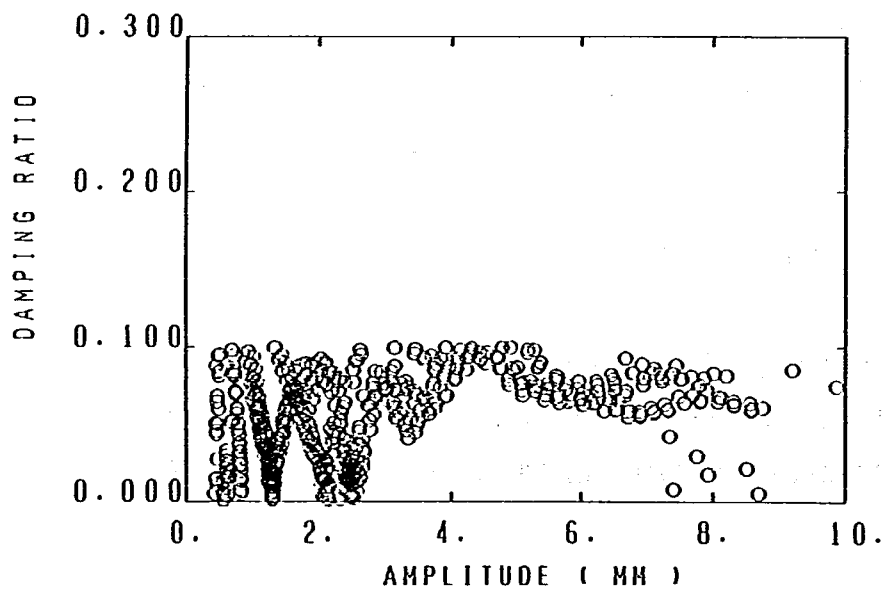


図-4.3.5.4 対数減衰率

(2) 解析

1) 解析手法

長さ方向中央をスペーサーで連結された並列ケーブルのモード減衰を複素固有値解析と直接積分法による時刻歴解析の2法で計算し、実験結果と比較する。解析は1斜材を20等分し、19格点の弦モデルとして微小変形理論による有限要素法で行った。ケーブルの剛性は無視する。ケーブルには張力165tfが導入されており、変形復元力は隣接2弦上の張力の合力として生じる。解析モデルを図-4.3.5.5に示す。

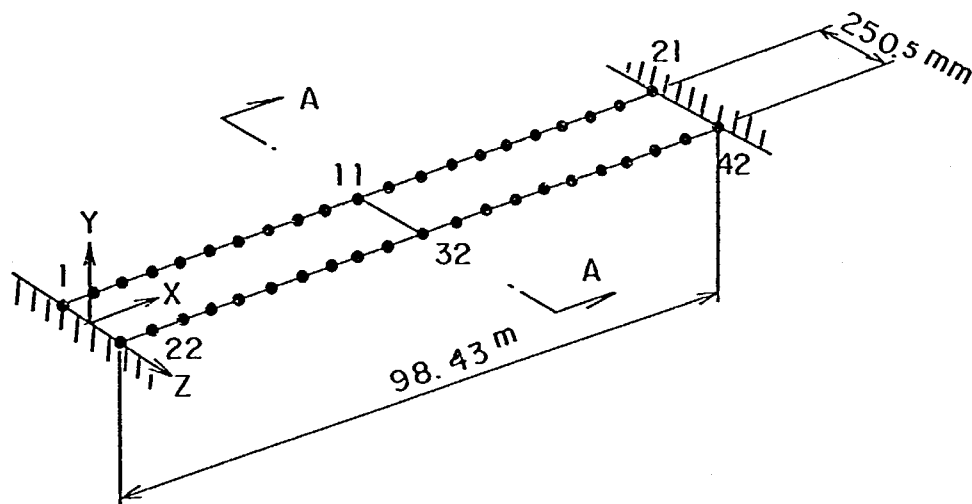


図-4.3.5.5 解析モデル

2) 複素固有値解析

(a) 円周方向運動の減衰係数 C_θ

スペーサー片側の高減衰ゴムで消費されるエネルギー J は、図-4.3.5.2のループで囲まれた面積で、 $604.75 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$ となる。平均減衰力 F とし、この減衰力 F を速度比例型の減衰に置き換える。なお、平均速度を $V = 2 \cdot \omega \cdot D \theta_{\max} / \pi$ とした。円周方向の運動の減衰係数 C_θ は次の値となる。

$$F = J / D \theta_{\max} / 2 = C_\theta \cdot V$$

$$C_\theta = 2.425 \text{ kgf} \cdot \text{sec} / \text{cm}$$

(b) 鉛直運動モデルの剛性 K_y 及び減衰係数 C_y

円周方向の運動を鉛直方向の運動に置き換える。2斜材中央点回りのモーメントの釣り合いから。ここで、7.175はケーブル中心から高減衰ゴムの外面までの半径、12.525はケーブル間隔の半分の値となっている。

$$M = 2 \times 7.175 \times 7.175 \times K_\theta = R_y \times 2 \times 12.525$$

2 斜材に作用する鉛直力 R は次式となる。

$$R_y = 2 \times 7.175 \times 7.175 \times K \theta / (2 \times 12.525)$$

2 斜材の鉛直相対変位は $2 \times 12.525 \text{ cm}$ である故、鉛直相対運動の剛性 K_y は次式となる。

$$K_y = 7.175 \times 7.175 \times K \theta / (2 \times 12.525 \times 12.525) \\ = 4.95 \text{ kgf/cm}$$

$$C_y = 7.175 \times 7.175 \times C \theta / (2 \times 12.525 \times 12.525) \\ = 0.398 \text{ kgf} \cdot \text{sec/cm}$$

格点11及び格点32を結ぶ要素の鉛直方向バネとして K_y を入力する。プログラムでは速度に減衰係数を乗じて減衰力を計算している。全格点に対数減衰率で 1% の構造減衰を設定する。減衰スパーサが 1 サイクル運動する間に鉛直運動モデルは 2 サイクル鉛直運動する。従って、スパーサの減衰として格点11及び格点32に減衰係数 $C_y / 4$ を、また 2 斜材の連成運動を評価するため、格点11及び格点32の連成項に減衰係数 $-C_y / 4$ を入力する。

(c) 複素固有値解析によるモード減衰

2 斜材逆対称モードの固有値は次の値となる。

$$R e = -0.1192$$

$$I m g = \pm 9.64$$

固有周期 T 及びモード減衰係数は次の値となる。

$$T = 0.6517 \text{ 秒}$$

$$c = 0.2383$$

対数減衰率 δ は次の値となる。

$$\delta = T \cdot c / 2 = 0.078$$

3) 時刻歴解析

(a) 鉛直バイリニアモデル諸元

応答計算はニューマークの β 法 ($\beta = 1/4$) を用いた直接積分法で、計算ステップは 0.01 秒で行った。対数減衰率で 1% の構造減衰を考慮することとし、これを質量比例で指定した。スパーサの減衰はバイリニア型履歴減衰として指定した。周期 0.65 秒で正弦変化する集中荷重を逆位相で、格点11と格点32に作用させて起振し、その後の自由減衰をシュミレートした。回転変形で減衰を生じる本スパーサの特性を、鉛直変形で減衰を生じる下記の鉛直バイリニアモデルに置き換へ計算を行った。

降伏変形: $Dy0 = D\theta0 / 7.175 \times 12.525 = 0.803\text{cm}$

1次剛性: $Ky1 = 7.175 \times 7.175 \times K\theta1 / (2 \times 12.525 \times 12.525)$
 $= 16.83\text{kgf/cm}$

2次剛性: $Ky2 = Ky1 \times K\theta2 / K\theta1$
 $= 3.59\text{kgf/cm}$

なお、上の鉛直バイリニアモデルの1履歴で消費されるエネルギーは、スペーサー片側の高減衰ゴムで消費されるエネルギー $604.75\text{kgf} \cdot \text{cm} (= \text{J})$ と等しくなる。1周期の間に鉛直バイリニアモデルは2サイクル運動する。

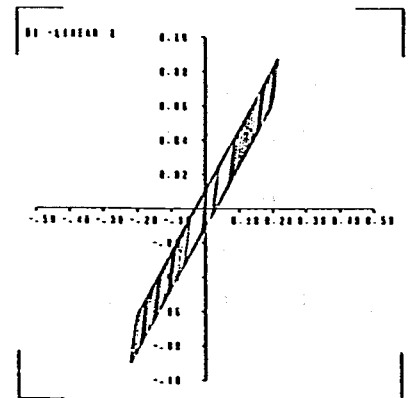


図-4.3.5.6 計算履歴

(b) 時刻歴解析によるモード減衰む

鉛直バイリニアモデルの計算履歴を図-4.3.5.6、応答変位波形より計算した対数減衰率を図-4.3.5.7に示す。時刻歴解析による2斜材逆対称モードの対数減衰率は6%~8%であった。

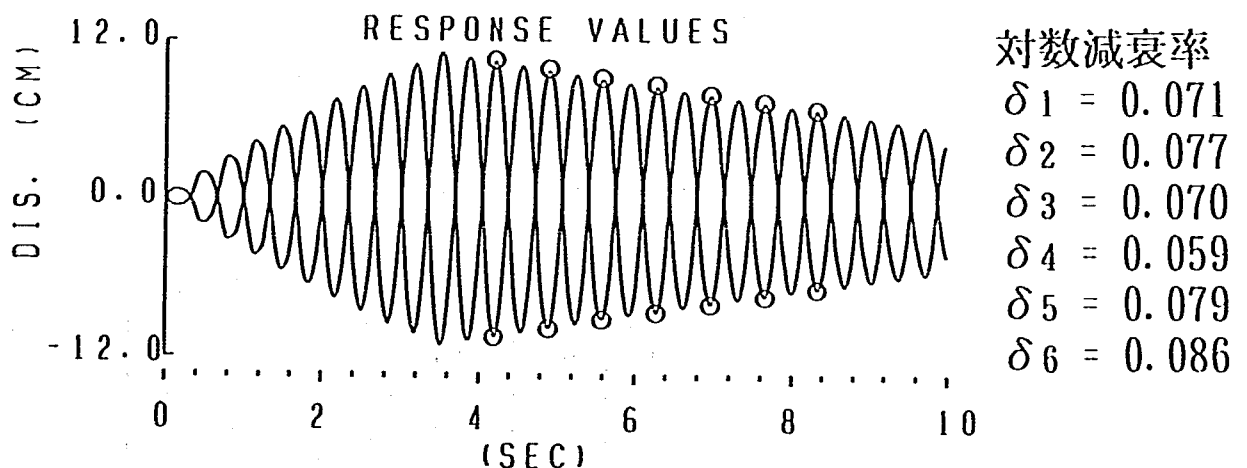


図-4.3.5.7 時刻歴解析による対数減衰率

(3) 実験結果と解析との対応

高減衰ゴムの変形率 γ (=せん断変形/ゴム高)を1.5として計算した、複素固有値解析による対数減衰率は7.8%、時刻歴解析による対数減衰率は6%~8%であり、実験記録から計算した対数減衰率は6%~8%と良く一致している。なお、変形率がより小さい場合の対数減衰率はより大きくなる。

(4) ねじれ減衰スペーサーの減衰効果

斜張橋ではしばしば並列ケーブル方式が採用される。並列ケーブルでは一方のケーブルの存在で風の流

れが特殊となり、風下側ケーブルが大きく振動するウェイクギャロッピング発現の恐れがある。対策として相互を剛に連結する方法があるが、大きいサブスパン振動、1次振動が発生する恐れがある。並列ケーブルの制振には、ケーブルを適度に相互拘束する機能とエネルギー減衰機能を兼ね備えたスペーサーを使用することが適当と考えられる。

高減衰ゴムの特性は、振幅が小さい振幅領域でバネ係数が大きく、減衰率も大きい。次に、高減衰ゴムの減衰はバイリニア型履歴減衰となる故、1サイクル運動で消費される履歴減衰エネルギーは振幅増分に比例して増加する。従って、ねじれ減衰スペーサーを装着した並列ケーブルでは、振幅が大きい領域で対数減衰率は小さくなるが、ほぼ一定となる。

図-4.3.5.8のねじれ減衰スペーサーを想定し、高減衰ゴムの変形率 γ （=せん断変形/ゴム高）を0.1,0.5,1.0,1.5、表-4.3.5.1のケーブルを対象として、複素固有値解析で計算した対数減衰率を表-4.3.5.3に示す。なお、高減衰ゴムの性能を保証する変形率は最大 $\gamma_{\max}=1.5$ となっている。ねじれ減衰スペーサーを用いて並列ケーブルの制振を設計する場合、想定される最大振幅状態で所要の対数減衰率を確保できることを前提に、最もバネが小さくなるようにスペーサ諸元を設定するのが良いと考えている。

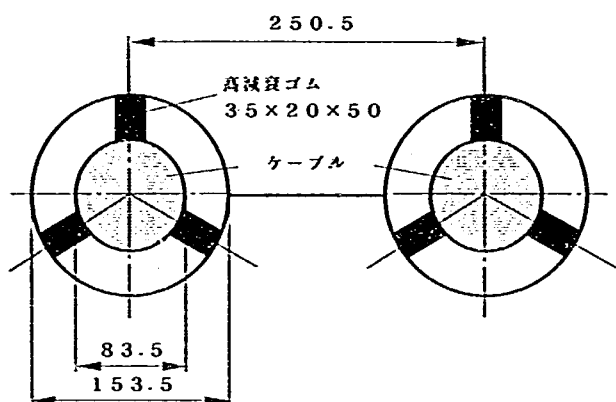


図-4.3.5.8 ねじれ減衰スペーサー

表-4.3.5.3 高減衰ゴムの変形率と対数減衰率

	$\gamma = 0.1$	$\gamma = 0.5$	$\gamma = 1.0$	$\gamma = 1.5$
KL301	23.4	14.2	10.5	8.9
KL201	17.2	9.4	6.3	5.5

4.3.6 摩擦型減衰機能付きスパーサー

(1) 装置の概要

本項では固体摩擦のエネルギー散逸による減衰力を利用したスパーサー型ケーブル制振装置の、実大ケーブルにおける減衰性能確認実験について述べる。図-4.3.6.1に摩擦型減衰機能付きスパーサーの概要を示す。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。

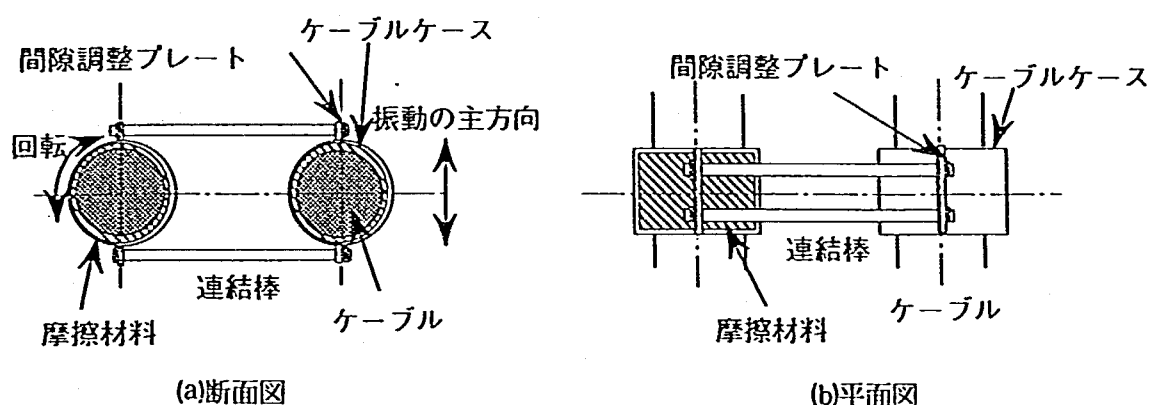


図-4.3.6.1 摩擦型減衰機能付きスパーサー

実験用スパーサーを写真-4.3.6.1～2に示した。これらのモデルでは、摩擦材料として金属（スパーサーA）及び摩擦材用布材（スパーサーB）を用いている。表-4.3.6.1に装置の諸元を示す。本装置は摩擦機構を利用するため、減衰性能が摩擦材料の動摩擦係数、表面積及びケーブルケースの締め付け力によって決定される。実験用モデルでは、半割りのケーブルケース間に間隙調整プレートを挟み込んでケーブルケースの径を変化させて締め付け力の調整を行った。また、スパーサーAの金属には静止摩擦係数が過大にならないように、表面に潤滑用のグリースを塗布した。

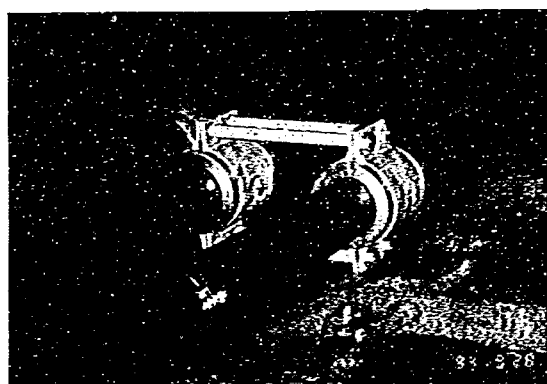


写真-4.3.6.1 スパーサーA

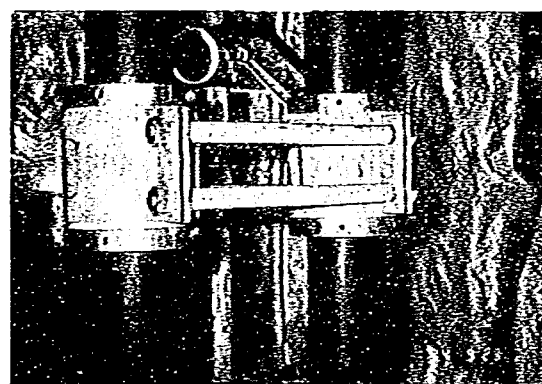


写真-4.3.6.2 スパーサーB

表-4.3.6.1 スパーサー諸元

種 類	摩 擦 材 料	摩擦材表面積 (cm ²)	動 摩 擦 係 数
スパーサーA	金属（表面湿潤状態）	314.2	0.2
スパーサーB	摩擦材用布材	314.2	0.4

(2) 実験結果

1) 配置試験

本実験は減衰部に金属を用いたスパーサーAを用い、装置の配置が減衰に及ぼす効果に注目して行ったものである。実験では図-4.3.6.2のように、スパーサーの取り付け位置を変化させて減衰性能の違いを観測した。表-4.3.6.2に実験ケース一覧を示す。実験では片側ケーブルを手加振しケーブルに1次モードの振動を生じさせ、基準振幅に達した時点で解放する自由振動実験を行った。スパーサーの減衰性能はケーブル系のねじれ振動（両ケーブルの相対振幅による振動波形）の対数減衰率で評価した。また、本スパーサーの作動原理は摩擦減衰機構を利用したものであり、減衰が振幅ごとに変化することから、対数減衰率をケーブルの振幅ごとに整理した（表-4.3.6.3）。また、ケーブル振幅としては相対振幅の1/2をケーブル径で除した無次元振幅を用いた。

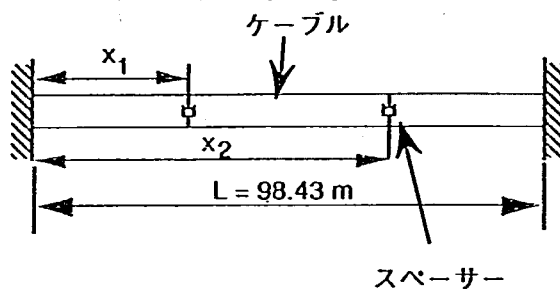


図-4.3.6.2 スパーサー配置

表-4.3.6.2 配置試験ケース

ケース	個数	スパーサー配置	自由度
1	1	$x_1 = 1/8L$	2
2	1	$x_1 = 1/3L$	2
3	1	$x_1 = 1/2L$	2
4	2	$x_1 = 1/8L, x_2 = 7/8L$	2

表-4.3.6.3 スパーサー設置位置、ケーブル振幅と対数減衰率の関係

スパーサー位置	対 数 減 衰 率 δ			
	無次元振幅0.4	無次元振幅0.3	無次元振幅0.2	無次元振幅0.1
$1/8L$	0.0178	0.0208	0.0261	0.0376
$1/3L$	0.0225	0.0268	0.0363	0.0753
$1/2L$				0.0779
$1/8L + 7/8L$	0.0343	0.0405	0.0520	0.0944

図-4.3.6.3は、実験結果をスパーサーの設置位置と対数減衰率の関係で整理したものである。スパーサーの設置位置がケーブル中央に近くなるほど、減衰率も大きくなっている。また $1/8L$ の場合と $(1/8L + 7/8L)$ の場合の比較から、スパーサーを複数設置した場合には減衰が大きくなることがわかる。

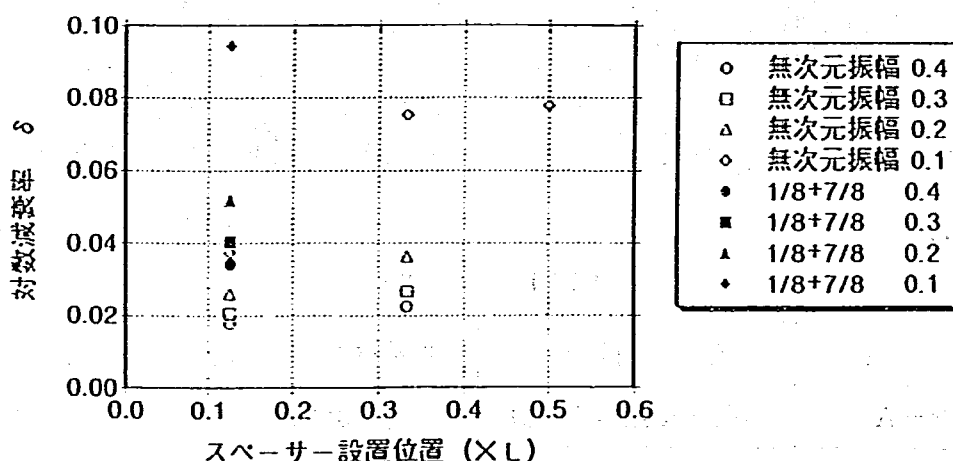


図-4.3.6.3 スパーサーの設置位置と対数減衰率の関係

図-4.3.6.4は実験結果をケーブル振幅と対数減衰率の関係で整理したものである。ケーブル振幅が減少するに伴い対数減衰率が大きくなり、摩擦減衰機構の特徴が現れている。図中の実線は、スペーサーの減衰力が一定と仮定した場合の、各振幅ごとの等価減衰定数から算定したケーブルの対数減衰率の推移を示したものである。実験結果の傾向はこの実線と良く一致しており、本スペーサーが想定通りの動作をしていることが確認できた。

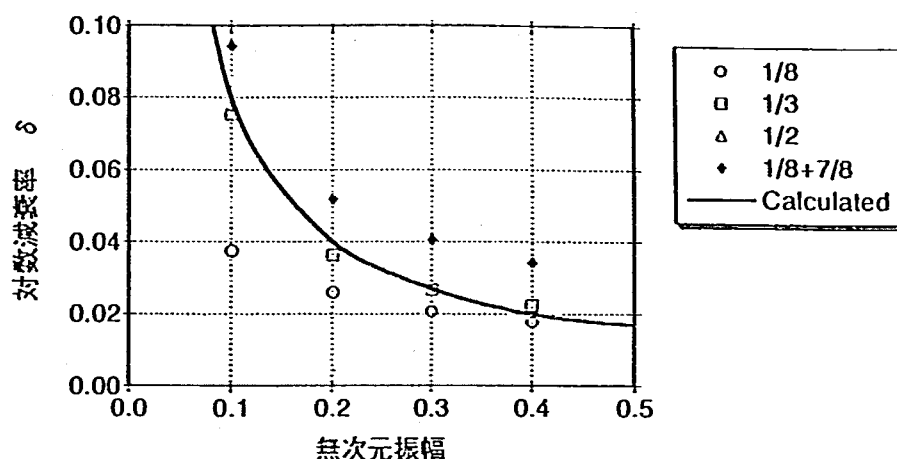


図-4.3.6.4 ケーブル振幅と対数減衰率の関係

2) 減衰性能調整試験

本実験は、スペーサー減衰部の摩擦力と減衰率の関係を把握する目的で行ったものである。この実験では減衰部に摩擦材用布材を用いたスペーサーBを使用した。減衰装置の摩擦力は摩擦面の締め付け力を変えることで調整した。摩擦面の締め付け力は、図-4.3.6.5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した。ケーブル加振方法は1)と同様の手順で、両ケーブルフリーの自由振動実験を行った。実験ケースを表-4.3.6.4に示す。実験結果についても1)と同様に、ケーブルのねじれ振動の対数減衰率を各振幅ごとに整理した(表-4.3.6.5)。

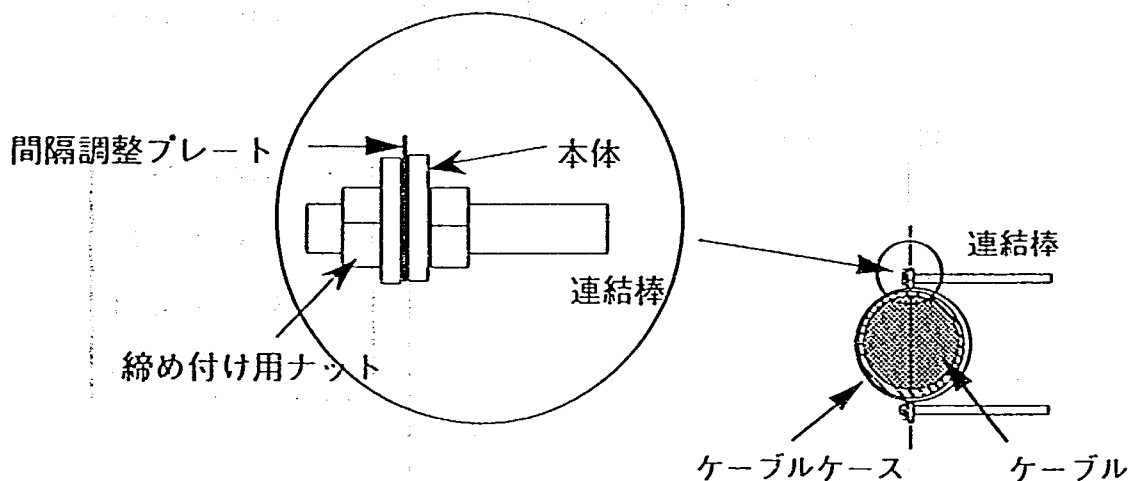


図-4.3.6.5 締め付け力調整用間隔調整プレート

表-4.3.6.4 減衰性能調整試験ケース

ケース	個 数	配 置	自 由 度	プ レ ー ト 枚 数
1	1	1/8L	2	1
2	1	1/8L	2	2
3	1	1/8L	2	3
4	1	1/8L	2	4
5	1	1/8L	2	5
6	1	1/8L	2	6
7	1	1/8L	2	7

表-4.3.6.5 間隔調整プレートの枚数、ケーブル振幅と対数減衰率の関係

間 隔 調 整 プレート枚数	対 数 減 衰 率 δ			
	無次元振幅0.4	無次元振幅0.3	無次元振幅0.2	無次元振幅0.1
1		0.0857	0.0703	0.0164
2		0.0875	0.0701	0.0169
3		0.0944	0.0863	0.0555
4		0.0854	0.0844	0.0699
5		0.0389	0.0487	0.0718
6	0.0203	0.0219	0.0272	0.0480
7	0.0150	0.0135	0.0182	0.0285

図-4.3.6.6は、実験結果を間隔調整プレートの枚数（締め付け力）と対数減衰率の関係で整理したものである。ここで、間隔調整プレートは枚数が少ないほど締め付け力大きい（減衰力大きい）ことになる。大振幅時（無次元振幅0.3）について比較すると、プレート枚数が多い（締め付け力が小さい）ほど対数減衰率が小さくなる傾向があるが、枚数が1～4枚の場合はあまり違いが見られない。一方小振幅時（無次元振幅0.1）においては、プレート枚数が1～2枚の場合に振幅が小さくなったにもかかわらず、対数減衰率が小さくなっている。この原因はケーブルケースの締め付け力が過大であったため、減衰装置の静止摩擦力がケーブルの小振幅でのねじれ反力を上回り、ケーブル自体がねじれたために減衰装置の相対振幅が小さくなったからである。このため減衰装置に期待されていた、摩擦によるエネルギー散逸が減少したためである。実験中に目視で観察したところ、これらの実験ケースでは小振幅時にはケーブルがねじれてしまい、減衰装置がうまく作動していないことが確認されている。

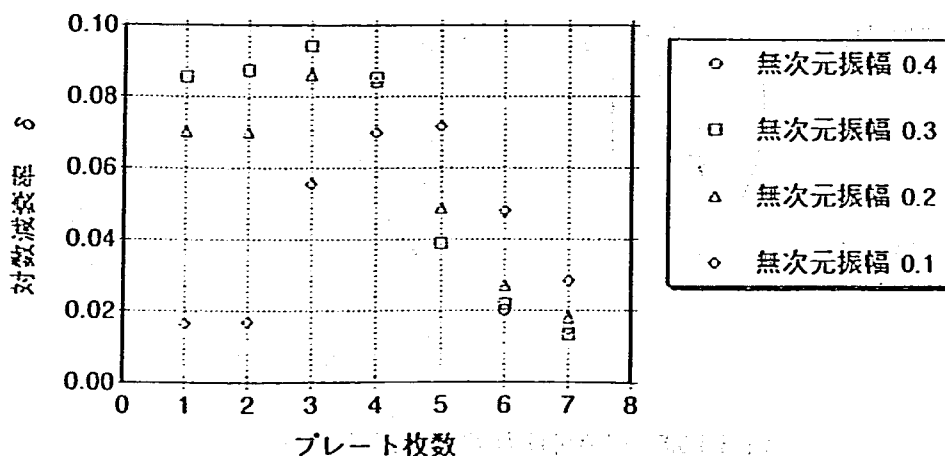


図-4.3.6.6 間隔調整プレートの枚数と対数減衰率の関係

図-4.3.6.7は、実験結果をケーブル振幅と対数減衰率の関係で整理したものである。プレート枚数が1～2枚の場合には、振幅の減少とともに減衰性能が劣化していくことがわかる。プレートが3～4枚の場合、大振幅時（無次元振幅0.3）には0.08～0.10程度の対数減衰率が得られ、小振幅に対しては0.05以上の対数減衰率を得ることができる。プレートが5枚以上の場合には振幅が小さくなるほど対数減衰率が大きくなり、図-4.3.6.4で考察したのと同様、減衰装置が想定通の動作をしている。しかしながら、この場合あまり大きな減衰性能は得られていない。

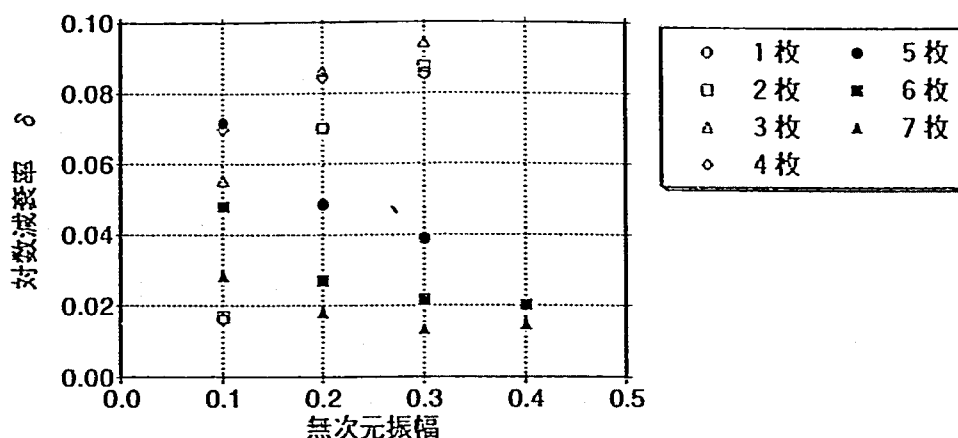


図-4.3.6.7 ケーブル振幅と対数減衰率の関係

(3) 考 察

減衰装置に必要な締め付け力を、例として最大の減衰性能の得られたプレート3枚の場合について求める。締め付け力を算定する基準振幅としては無次元振幅0.3を用いる。表-4.3.6.5よりこのときのケーブルの対数減衰率は $\delta = 0.094$ である。実験を行った並列ケーブル系の複素固有値解析結果（図-4.3.6.8）を用いると、減衰機能付きスペーサーを1/8L点に設置した場合対数減衰率 $\delta = 0.094$ を与える減衰係数は $C = 0.10tf \cdot \text{sec}/\text{m}$ である。ここではこれを、基準振幅における等価減衰係数 C_e とみなす。摩擦型減衰機能付きスペーサーの減衰力とケーブルケースの締め付け力の関係については、平成5年度の研究成果1）において報告されているので、ここではそれに従って締め付け力を算定する。

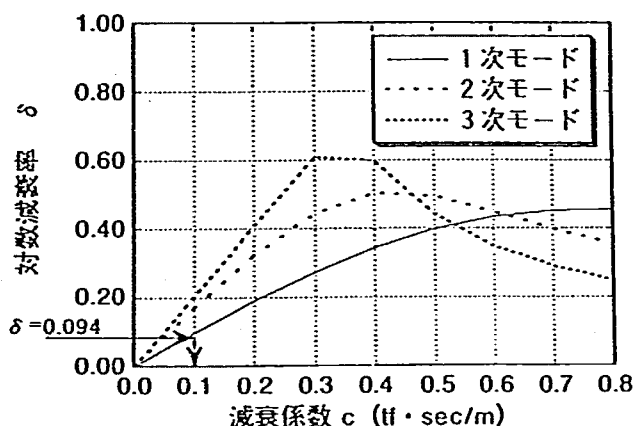


図-4.3.6.8 複素固有値解析によるケーブル系のモード減衰（対数減衰率換算）解析結果

[計 算]

計算条件：等価減衰係数 $C_e = 0.10tf \cdot \text{sec}/\text{m}$ 、ケーブルの振動数 $f = 1.54\text{Hz}$ 、基準振幅0.3D、減衰部の外周（摩擦材とケーブルケースの接触部分） $d = 10\text{cm}$

基準振幅と幾何学的条件から、ケーブルケースの回転角 θ と摩擦材とケーブルケースとの相対変位 Δ を算定すると、

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{0.3D \cdot \sin(180/8)}{1.5D}\right) = 4.39(\text{deg})$$

$$\Delta = \pi d \times \frac{\theta_c}{360} = 0.384(\text{cm})$$

これよりケーブルに働く減衰力 F_c は、

$$F_c = \frac{1}{4}\pi\omega\Delta C_c = 292(\text{kgf})$$

ケーブルに作用する鉛直方向の力とケーブル円周上に作用する力の釣り合いから、減衰装置に作用する減衰力 F_D は、

$$F_D = \frac{F_c \cdot 3D}{0.5d} = 14.6(\text{kgf})$$

減衰力は両ケーブルの減衰装置で生じているから、減衰装置1基当たりの減衰力は $F_D = 7.3\text{kgf}$ となる。摩擦材用布材の動摩擦係数は $\mu = 0.4$ であるから、ケーブルケース1個当たりの締め付け力 R は 18.3kgf となる。

次に、スペーサーの締め付け力から予想されるケーブルのねじれ角を求めてみる。摩擦材用布材の静止摩擦係数を $\mu' = 0.6$ とすると先に算定した締め付け力を用いると、ケーブル回りに働く静止摩擦力は $F_f = 11.0\text{kgf}$ となる。本実験の実施に伴って実験的に求められたケーブルのねじり剛性と、静止摩擦力より生じるケーブル回りの偶力の釣り合いを考えて、ケーブルのねじれ角を算定する。

[計 算]

計算条件：設置位置1/8L点 ($l = 100\text{m}, l_1 = 12.5\text{m}, l_2 = 87.5\text{m}$)、ねじり剛性 $GJ = 0.511\text{tf} \cdot \text{m}^2$

ねじり剛性 GJ より等価な回転ばね k_R を算定すると、

$$k_R = \frac{GJ \cdot L}{L_1 \cdot L_2} = 4.67 \times 10^3 (\text{kgf} \cdot \text{cm} / \text{rad})$$

ケーブル回りの偶力 T は、

$$T = F_f \times \frac{d}{2} = 55.0 (\text{kgf} \cdot \text{cm})$$

従って、ねじれ角 θ_f は、

$$\theta_f = \frac{T}{k_R} = 0.011(\text{rad}) = 0.63(\text{deg})$$

このように、静止摩擦力より想定されるケーブルのねじれ角 θ_f は、ケーブルの相対変位より想定されるスペーサーの回転角 θ_c よりもかなり小さい。当然、振幅が小さくなった場合にはケーブルのねじれ角 θ_f の影響により、減衰性能の劣化が起こることが予想される。しかしながら、実験においては振幅がそれほど減少していない段階から減衰性能の低下が見られており、この算定結果とは相いれない。その原因として、スペーサーの加工精度及び設置精度が考えられる。減衰機構が摩擦型であるため、摩擦面の接触の具合が減衰性能や作動状態にかなりの影響を及ぼすものと考えられる。これは、本装置の実用化にあたり解決すべき課題であるとともに、減衰性能改善の鍵であると考えられる。

(4) まとめ

摩擦型減衰機能付きスペーサーの実大ケーブル実験を行った結果、以下のような知見が得られた。

1) ケーブル系の1次モードの対数減衰率は、スペーサーの設置位置をケーブル中央に近づけるほど大きくなる。また、スペーサーを複数個配置することで、減衰性能を高めることができる。

- 2) スペーサの減衰性能は、ケーブルケースの締め付け力を調整することで変更することができる。しかしながらケーブルケースに過大な締め付け力を与えると、減衰部の静止摩擦力とケーブルのねじれ剛性の相対的な大小関係からケーブルのねじれ角が大きくなることがあり、減衰性能が低下する。
- 3) 今回実施した実験の範囲では、スペーサの設置によりケーブル系の1次モードの対数減衰率が最大 $\delta=0.10$ 程度に向上した。スペーサの加工精度及び設置精度を向上させれば、減衰性能のさらなる向上を見込めるものと考えられる。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：斜張橋並列ケーブル耐風制振に関する共同研究報告書（その2），
pp.184-185，平成6年9月

4.3.7 風洞実験

(1) 風洞実験の目的

スペーサのウエイク・ギャロッピングに対する制振効果を確認することが本実験の目的である。具体的には、1及び2自由度振動系におけるウエイク・ギャロッピング発現の確認（1自由度系とは風上側を固定した実験を意味する）した後、無風時において減衰効果が期待できると確認されたスペーサについて、以下に示す項目について検討した。

- ・逆相振動に対するスペーサの制振効果の確認（振動発現時の初期条件の影響の確認）
- ・逆相振動に対する減衰力と制振効果の関係の把握（パラメータ：スペーサの減衰性能）
- ・同相振動に対する振幅と減衰率の関係の把握（パラメータ：ケーブルの減衰率）
- ・ケーブルのねじれ剛性の影響（パラメータ：ケーブルの回転の有無）

(2) 実験内容

表-4.3.7.1に実験ケースの一覧を示す。各実験ケースの内容は以下の通りである。

実験番号1～5はスペーサのない場合で、1及び2自由度系でウエイク・ギャロッピングの発現を確認するものである。1自由度系と2自由度系を比較することにより、風上側ケーブルの振動の影響を把握することが出来るとともに、従来の多くの実験結果と比較することが可能となる。また、ウエイク・ギャロッピングの抑制が可能な構造減衰の目安を得るために、ケーブルの減衰率を変化させたケースを加えている。

実験番号6、7は両ケーブルを剛結合した場合である。両者の相違はケーブルのねじれ剛性の有無である。同相振動のみの場合のウエイク・ギャロッピングの発現の有無を検討することが出来る。また、ねじれ剛性のモデル化のために使用したベアリングの減衰特性を評価するものである。

実験番号8～15が各スペーサの効果を検討するものである。いずれも、2自由度系、構造減衰0.01において実施するもので、ねじれ剛性の有無とスペーサの減衰性能がパラメータとなっている。ねじれ剛性の有無を比較することによって、純粋なスペーサの効果を把握することが出来る。以下に各スペーサの減衰性能を変化させるパラメータを示す。

実験番号7～9、14がスペーサタイプS（住友タイプ：せん断型）の場合である。高減衰ゴムの材質と引張断面積がパラメータとなっており、これらを変化させることによって、系のバネ定数と粘性係数を調

節するものである。このスパーサは実際にはせん断型のスパーサであるが、直接の模型化が困難なために、ヒステリシスループがほぼ等価な引張型のスパーサとして模型化している。

実験番号11～13、15がスパーサタイプO（大林タイプ：摩擦型）の場合で、摩擦面積がパラメータとなっており、摩擦材の接触面積を変化させることによって、系の係数を調節する。

実験番号16、17は1自由度系での実験である。2自由度系と比較することにより、スパーサが存在する場合の風上側のケーブル振動の影響を調査することが出来る。

実験番号18、19はケーブルの構造減衰を変化させた場合で、他の制振方法とスパーサを組み合わせた場合の制振効果を調査するものである。

(3) 実験方法

実験は(株)大林組技術研究所環境研究センター内に設置された大型多目的風洞を用いて実施した。多目的風洞の主要諸元を表-4.3.7.2に示す。また、図-4.3.7.1に2次元バネ支持試験装置を示す。

今回使用するバネ支持試験装置は上流及び下流側のケーブルともに、それぞれ4本のケーブルによって支持され、鉛直方向の振動に対して自由度を有する構造となっている。ケーブルのねじれ剛性はバネとケーブルの連結部分にベアリングを組み込み、そのベアリングの回転を拘束もしくは許容することでモデル化した。この場合、ケーブルは自由に回転できるが、ベアリング自体が回転に対する摩擦減衰を有することになる。ケーブルの構造減衰は電磁式加振減衰器を用いて所要値に設定した。また、ケーブルの流れ止め装置やローリング止め装置などを有している。振動振幅は4ヶ所に設置したレーザ変位計により計測した。なお、振幅は1D(D:ケーブルの直径)程度可能な状態にした。

表-4.3.7.1 実験ケース一覧

実験 番号	自由度		ケーブル減衰率				ねじれ剛性		スパーサタイプ				減衰性能		
	1	2	0.01	0.02	0.05	0.10	有	無	なし	剛結	S	O	1	2	3
1		○	○				-	-	○				-	-	-
2		○		○			-	-	○				-	-	-
3		○			○		-	-	○				-	-	-
4		○				○	-	-	○				-	-	-
5	○		○				-	-	○				-	-	-
6		○	○				○			○			-	-	-
7		○	○					○		○			-	-	-
8		○	○				○				○		○		
9		○	○				○				○			○	
10		○	○				○				○				○
11		○	○				○					○	○		
12		○	○				○					○		○	
13		○	○				○					○			○
14		○	○					○			○			○	
15		○	○					○				○	○		
16	○		○				○				○			○	
17	○		○				○					○	○		
18		○			○		○					○	○		
19		○				○	○					○	○		

表-4.3.7.2 多目的風洞諸元

主 要 寸 法	風洞形式		単回路回流式密閉型風洞
	測定 洞	幅 (mm) 高 (mm) 長 (mm)	3,000 3,000 9,000
送 風 機	縮 流 洞	入 口(mm×mm) 出 口(mm×mm) 縮流比	6,000×6,000 3,000×3,000 4
	風格全長(mm)		120,000
風 機	形 式	後置静翼単段軸流送風機	
	口 径 (mm)	4,000	
	風 量 (m³/s)	360	
	動 圧 (mmAq)	150	
	出 力 (KW)	700	
制 御	回転数 (rpm)	500	
	制 御	サイリスタ制御	
気 流	最大風速(m/s)	40	
	乱れ強さ(%)	0.5	
付属計測機器等			

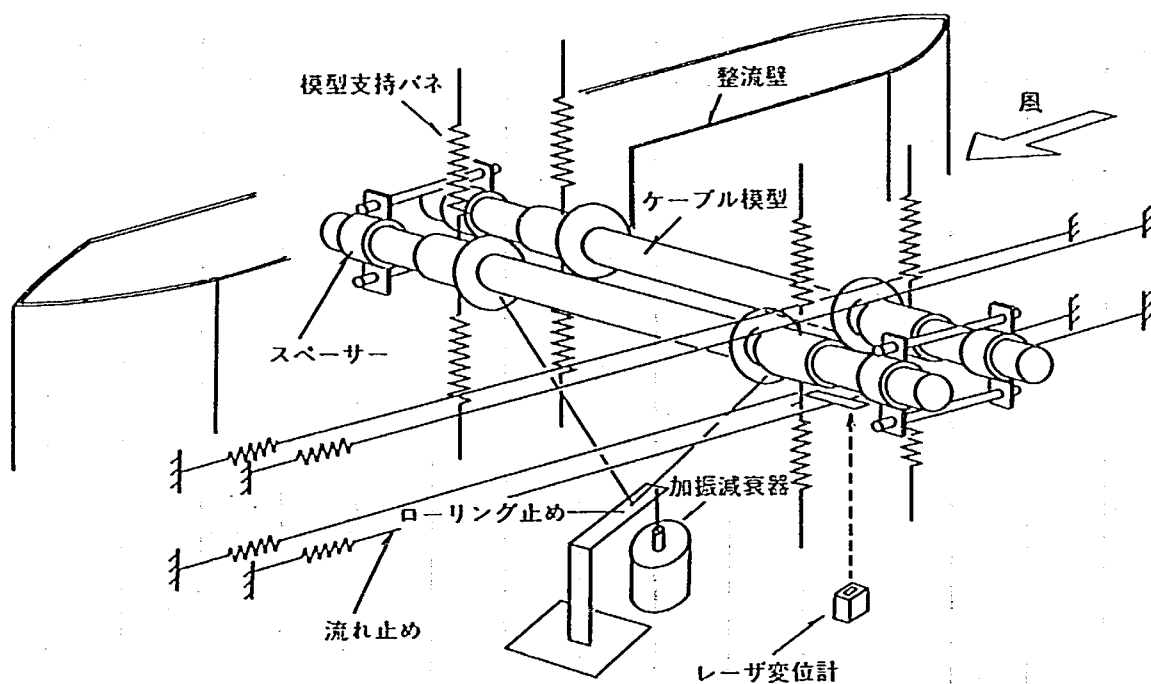


図-4.3.7.1 実験装置の概要

(4) 実験条件

バネ支持模型実験では、相似条件として幾何学的形状を相似させることの他に、次の3つの無次元量を実橋と模型とで一致させた。

$$m/\rho D^2, V/fD, \delta$$

ここに、 m ; 単位長さ当りの質量

ρ ; 空気密度

D ; ケーブル径

V ; 風速

f ; 固有振動数

δ ; 無風時における対数減衰率

1) 実ケーブルの諸元

実ケーブルとしては SEEE 工法で使用する斜材の内でも最も径の大きい F500PH を想定した。以下に実ケーブルの諸元を示す。

長さ(L_p) : 100.00m

直径(D_p) : 96.00mm

単位重量(W_p) : 24.62kgf/m

導入軸力(T_p) : 180.00tf

振動数(f_p) : 1.34Hz

対数減衰率(δ) : 0.01

スクルトン数(Sc) : 43.62

2) 模型の諸元

ケーブル模型には表面処理等を何も施していないアルミパイプを使用した。以下に模型の諸元と実験条件を示す。

縮	尺(n)	: 1.92
長	さ(L _m)	: 860.00mm
直	径(D _m)	: 50.00mm
単 位 重 量	(W _m)	: 6.68kgf/m
模 型 重 量	(W)	: 5.74kgf/model
振 動 数	(f _m)	: 2.68Hz
対数減衰率(δ)		: 0.01
スクルトン数(Sc)		: 43.62

(5) 実験結果

表-4.3.7.3に実験結果の一覧を、図-4.3.7.2~20に風速~振幅関係(上下流成分及びたわみ、ねじれ成分)を示す。図-4.3.7.21, 22にはせん断型及び摩擦型スパーサを取り付けた場合のねじれ成分振動波形を示す。ここで、振幅のねじれ成分はケーブル間の中央を回転中心とした時の片振幅(以後も同様)を示している。また、せん断型と摩擦型では減衰性状が異なるのでせん断型では対数減衰率、摩擦型では減衰比によってスパーサの減衰性能を表示した。

1) スパーサの減衰性能

図-4.3.7.23, 24はスパーサの減衰性能を変化させた場合の風速とねじれ振幅成分の関係を示している。

スパーサの有無に関わらず、不安定なリミットサイクルを持つハード型のウエイクギャロッピングが発現した。スパーサがない場合には風速5.9m/s(換算風速:Vr=44)で振動が発現した後、風速30m/s(Vr=224)以上の振幅の大きい領域でも不安定なリミットサイクルが存在した。

一方、スパーサが有る場合はせん断型、摩擦型ともに、ウエイクギャロッピングのquench点がそれぞれの減衰性能にほぼ比例(図-4.3.7.31, 32参照)して高くなった。また、スパーサなしでは風速7.4m/sであったself starting点の実験風速域では観測されなくなる傾向を示した。実大模型実験で得られた0.1程度の減衰率で16m/s前後まで発現しなくなり、もっとも良好な場合で21m/s(Vr=157)まで上昇した。

2) 構造減衰の影響

図-4.3.7.25, 26はケーブルの構造減衰の影響による性状の変化を比較したものである。

スパーサがない場合はquench点が構造減衰にほぼ比例(図-4.3.7.33, 34参照)して高くなるが、構造減衰0.1でも風速16m/s(Vr=119)程度であった。また、この場合でもself starting点は風速25m/s(Vr=186)程度であった。

スパーサが有る場合は摩擦型(減衰比:0.84)の結果である。この場合、構造減衰0.01でもquench点は16m/s程度あり、実験風速域では前述のようにself starting点はなくなり、振動発現が抑制されている。

構造減衰0.1で quench 点は約22m/s($V_r=166$)となった。

3) 自由度の影響

図-4.3.7.27, 28は上流側ケーブルを固定して実験を行い、ケーブルの自由度の影響を比較したものである。

スペーサがない場合は上流側が固定されているかどうかに関わらず、ほぼ同一の挙動を示しており、ウエイクギャロッピング発現時に上流側ケーブルは非常に安定な状態にあると考えられる。

一方、スペーサが有る場合は上流側を固定するとウエイクギャロッピングの発現風速がやや低くなるが、振幅(ねじれ成分)には大きな相違はない。この時、上流側ケーブルがスペーサの影響により振動している場合には、下流側の振幅は相対的に小さくなっている。なお、図はせん断型の結果であるが摩擦型でも同様の傾向を示した。

4) ねじれ剛性の影響

図-4.3.7.29, 30はケーブルの回転を許して実験を行い、ケーブルのねじれ剛性の影響を検討したものである。

ねじれ剛性がない場合はある場合と比べて性能が低下すると考えられたが、せん断型の場合ではねじれ剛性のない方がquench点がより高風速となり、摩擦型ではほとんど同一であった。また、上下流ケーブルを剛結にした場合でも、ケーブルの回転を許容するために組み込んだベアリングが減衰性能を有しているために、摩擦型のスペーサを組み込んだ場合と同じような効果を示した。その結果、せん断型の場合は両者の減衰性能が加算されるような効果によって発現風速が上昇し、摩擦型ではスペーサかベアリングのどちらか一方しか減衰性能を発揮出来ないために発現風速に変化がなかったと考えられる。

表-4.3.7.3 実験結果一覧

実験番号	自由度	構造減衰	ねじれ 剛性	スパーサ タイプ	スパーサ 減衰性能	振動数 (Hz)				キョロビソク 発現風速(m/s)	
						上流側	下流側	たわみ	ねじれ	quench点	self starting点
1	2	0.01	-	なし	-	2.68	2.68	2.69	2.69	5.90	7.40
2	2	0.02	-	なし	-	2.68	2.68	2.69	2.69	6.90	9.90
3	2	0.05	-	なし	-	2.68	2.68	2.68	2.68	13.30	17.90
4	2	0.10	-	なし	-	2.68	2.69	2.68	2.68	16.10	27.20
5	1	0.01	-	なし	-	-	2.68	-	-	5.90	6.90
6	2	0.01	有	剛結	-	-	-	2.68	-	-	-
7	2	0.01	無	剛結	-	2.69	2.68	2.69	2.68	14.80	40m/s以上
8	2	0.01	有	せん断型	0.06	2.68	2.68	2.68	2.73	12.80	40m/s以上
9	2	0.01	有	せん断型	0.15	2.68	2.67	2.68	2.78	14.90	40m/s以上
10	2	0.01	有	せん断型	0.20	2.71	2.69	2.68	2.83	20.00	40m/s以上
11	2	0.01	有	摩擦型	0.84	2.68	2.68	2.71	2.61	16.10	35.00
12	2	0.01	有	摩擦型	1.47	2.68	2.68	2.68	2.62	18.50	40m/s以上
13	2	0.01	有	摩擦型	1.59	2.68	2.69	2.68	2.60	21.00	40m/s以上
14	2	0.01	無	せん断型	0.15	2.68	2.69	2.69	2.70	23.40	40m/s以上
15	2	0.01	無	摩擦型	0.84	2.68	2.69	2.68	2.66	16.70	40m/s以上
16	1	0.01	有	せん断型	0.15	-	2.74	-	-	13.00	40m/s以上
17	1	0.01	有	摩擦型	0.84	-	2.69	-	-	11.00	40m/s以上
18	2	0.05	有	摩擦型	0.84	2.68	2.68	2.68	2.65	19.80	40m/s以上
19	2	0.10	有	摩擦型	0.84	2.68	2.68	2.69	2.66	22.20	40m/s以上

注1) 構造減衰、スパーサ減衰性能、振動数は無風時の値を示している。

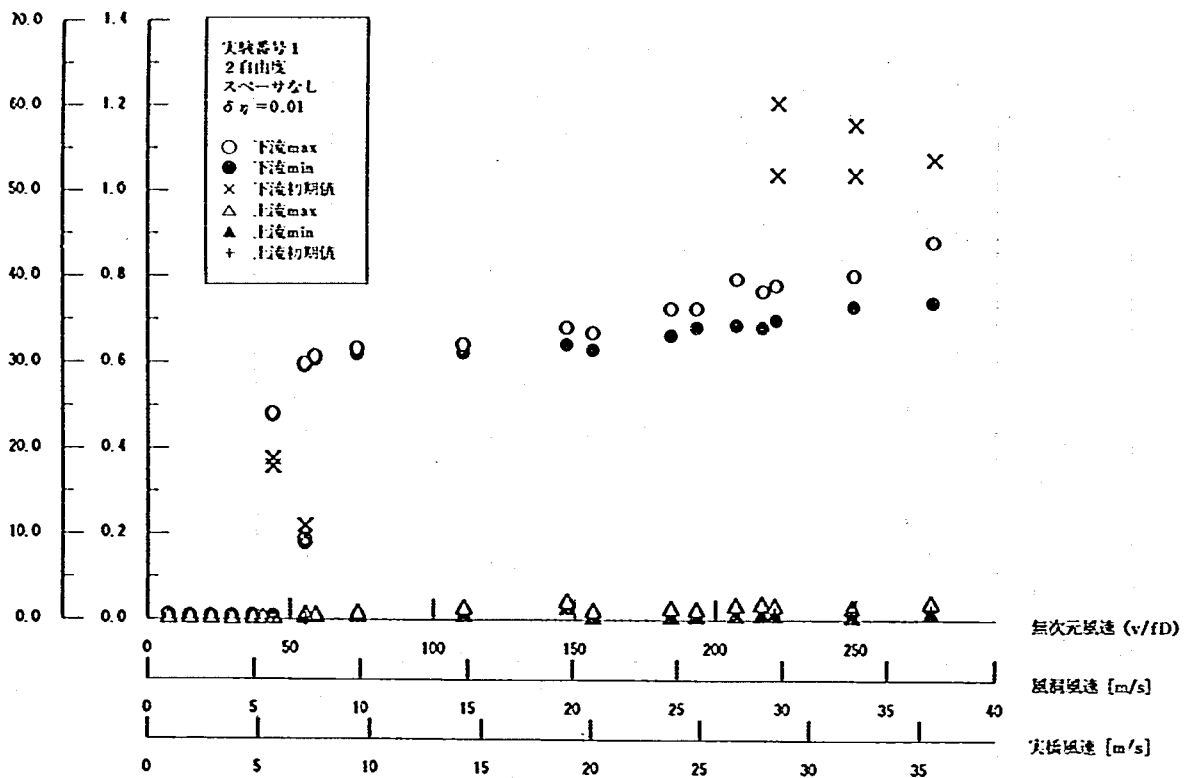
注2) 最大振幅及びハート型発現振幅の振幅は次の値を示している。

下流側：下流側ケーブルの片振幅

鉛直間隔：上流側ケーブルと下流側ケーブルの鉛直間隔

注3) 減衰性能はせん断型ではねじれ振動成分の対数減衰率、摩擦型ではねじれ振動成分の減衰比を示している。

実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)



実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)

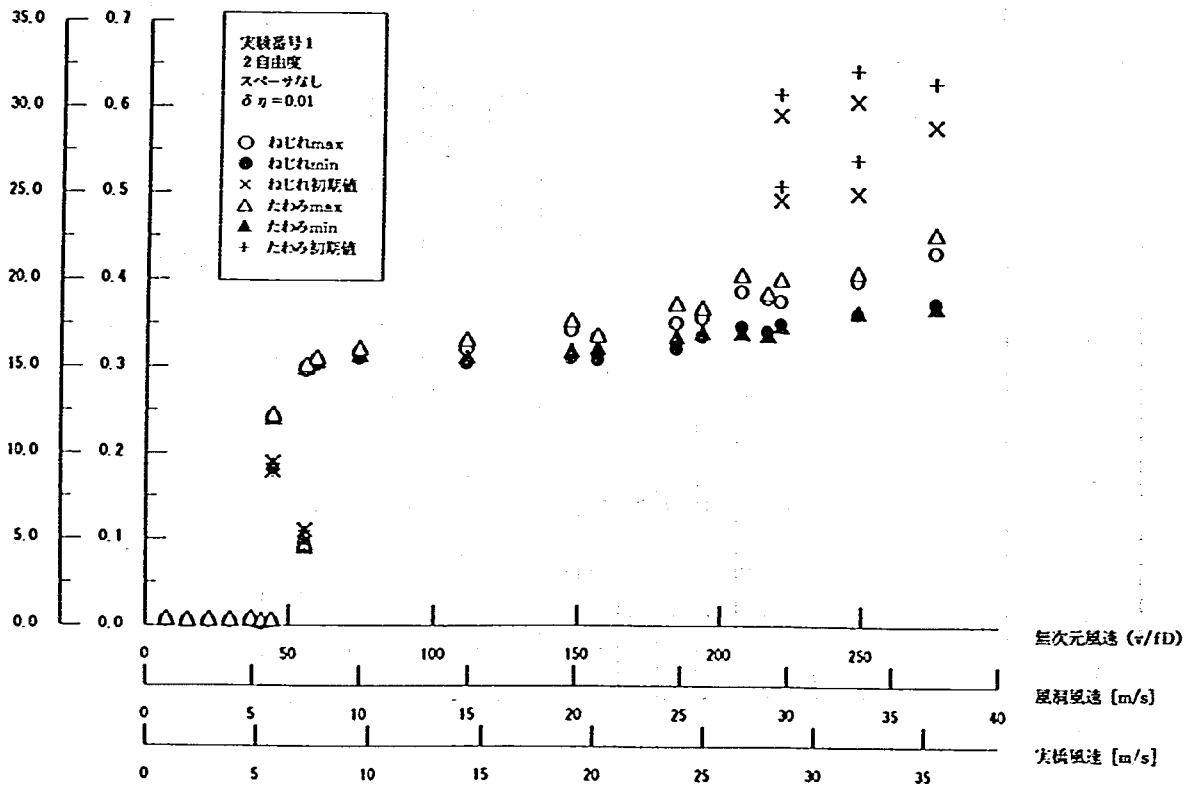
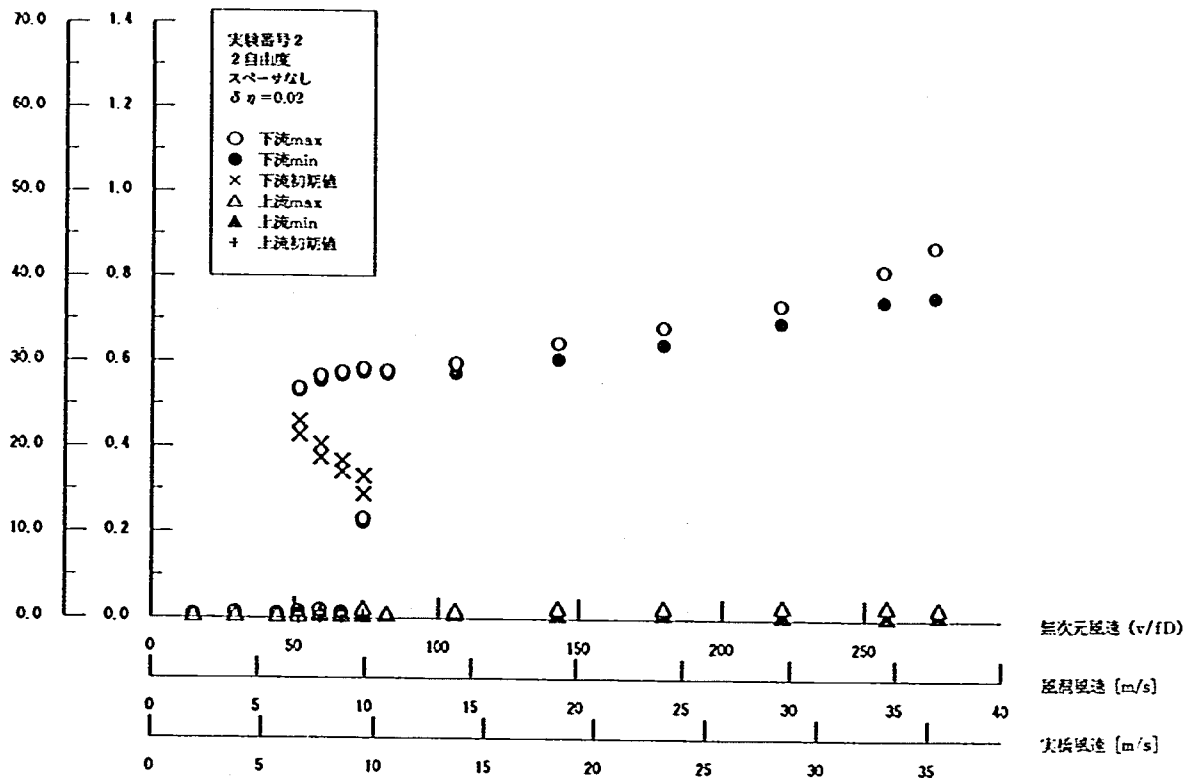


図-4.3.7.2 風速一振幅 曲線

実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)



実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)

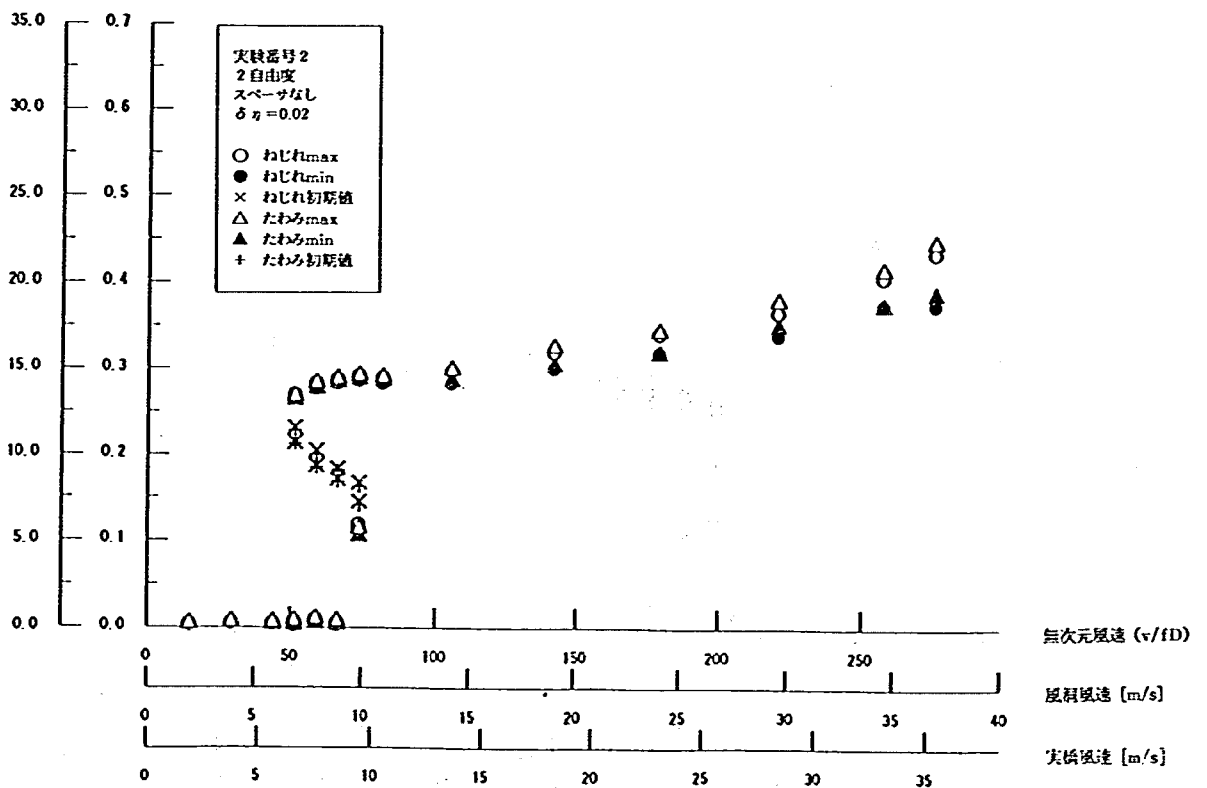
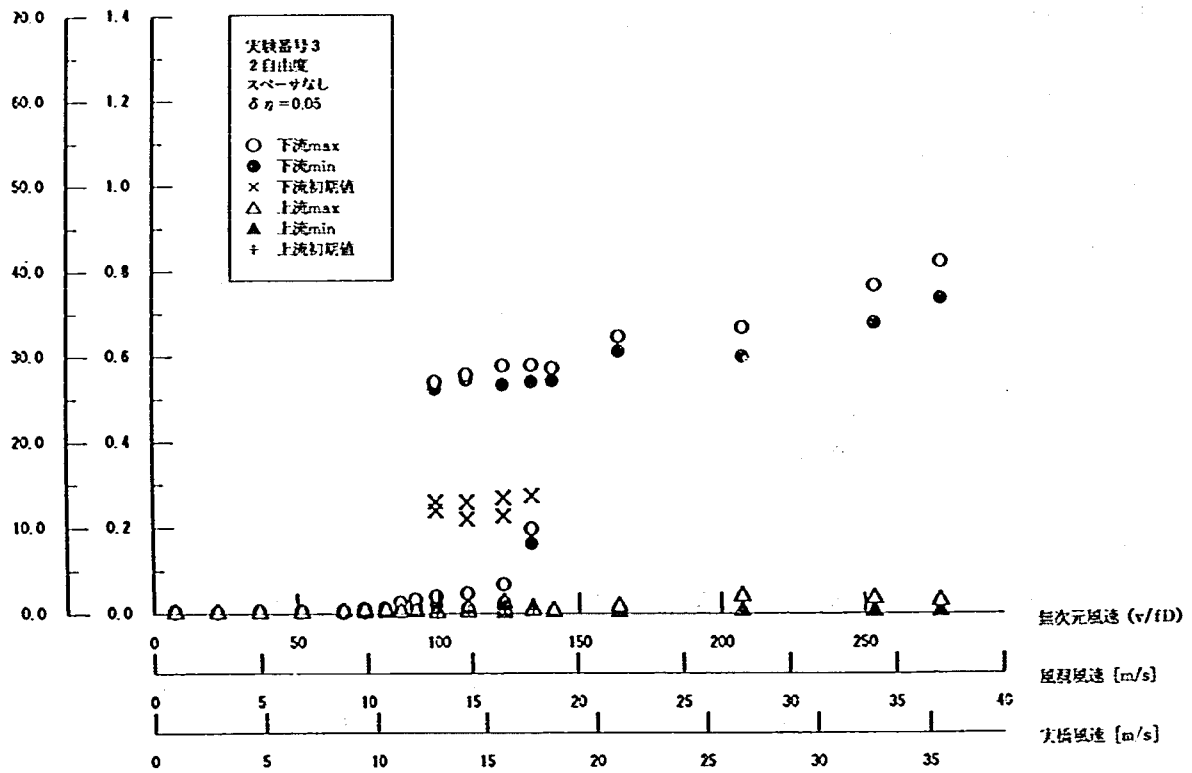


図-4.3.7.3 風速—振幅 曲線

実振幅 [cm] 無次元振幅 (η/D)



実振幅 [cm] 無次元振幅 (η/D)

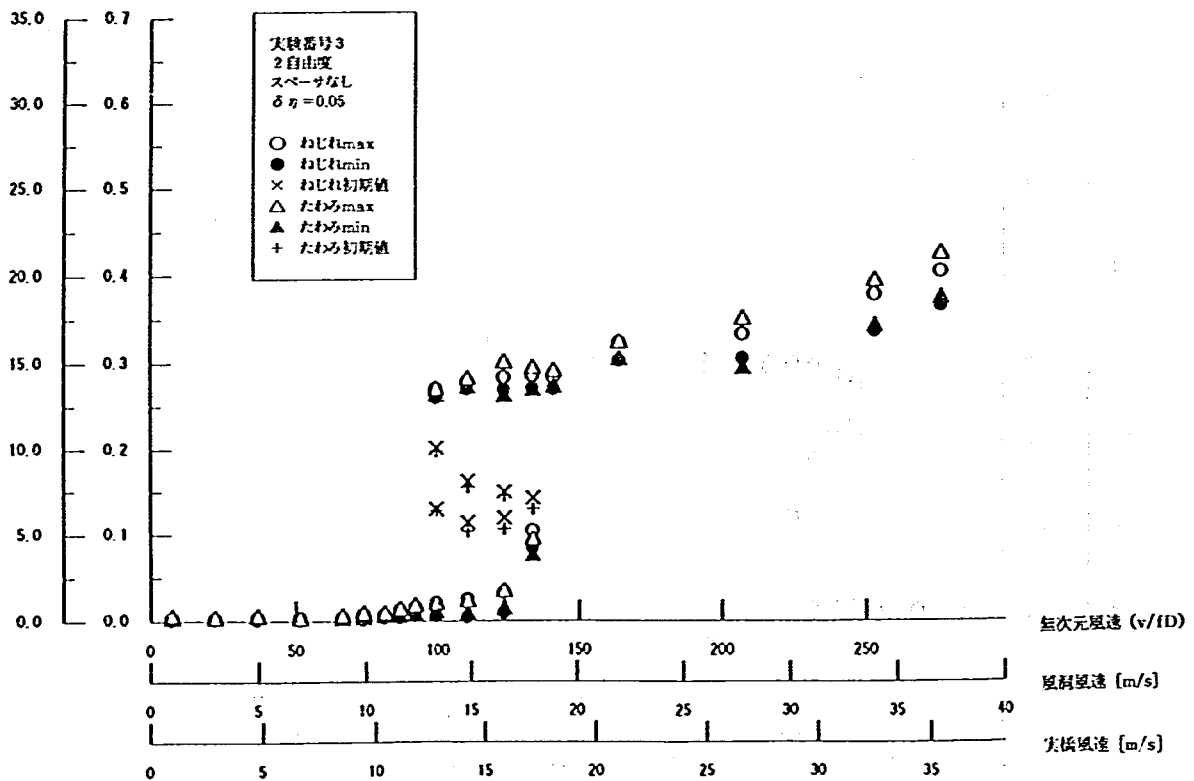
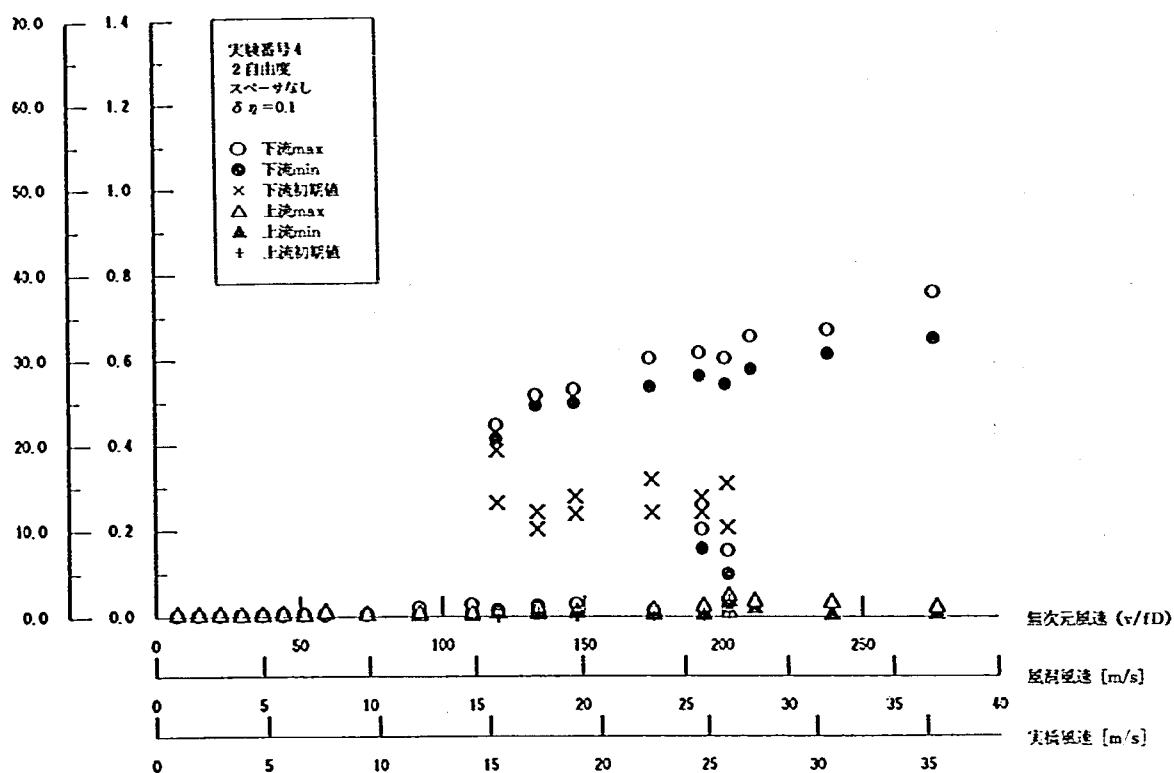


図-4.3.7.4 風速一振幅・曲線

実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)



実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)

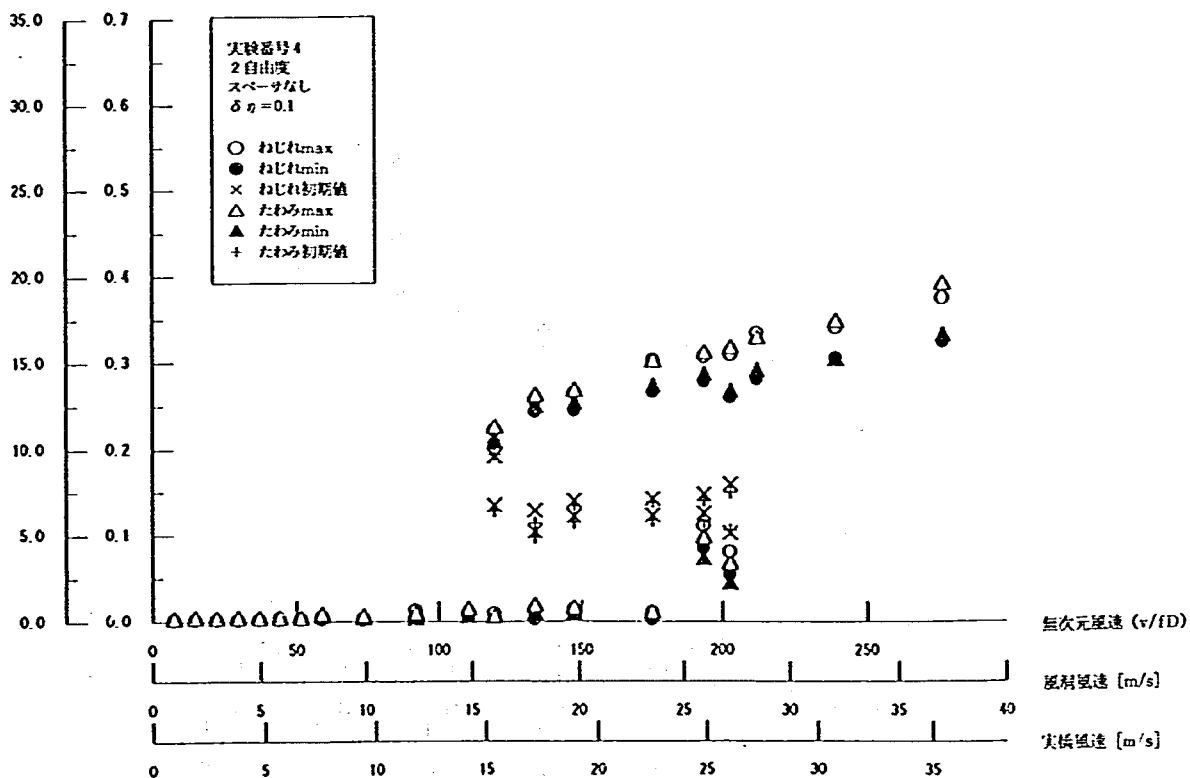


図-4.3.7.5 風速—振幅 曲線

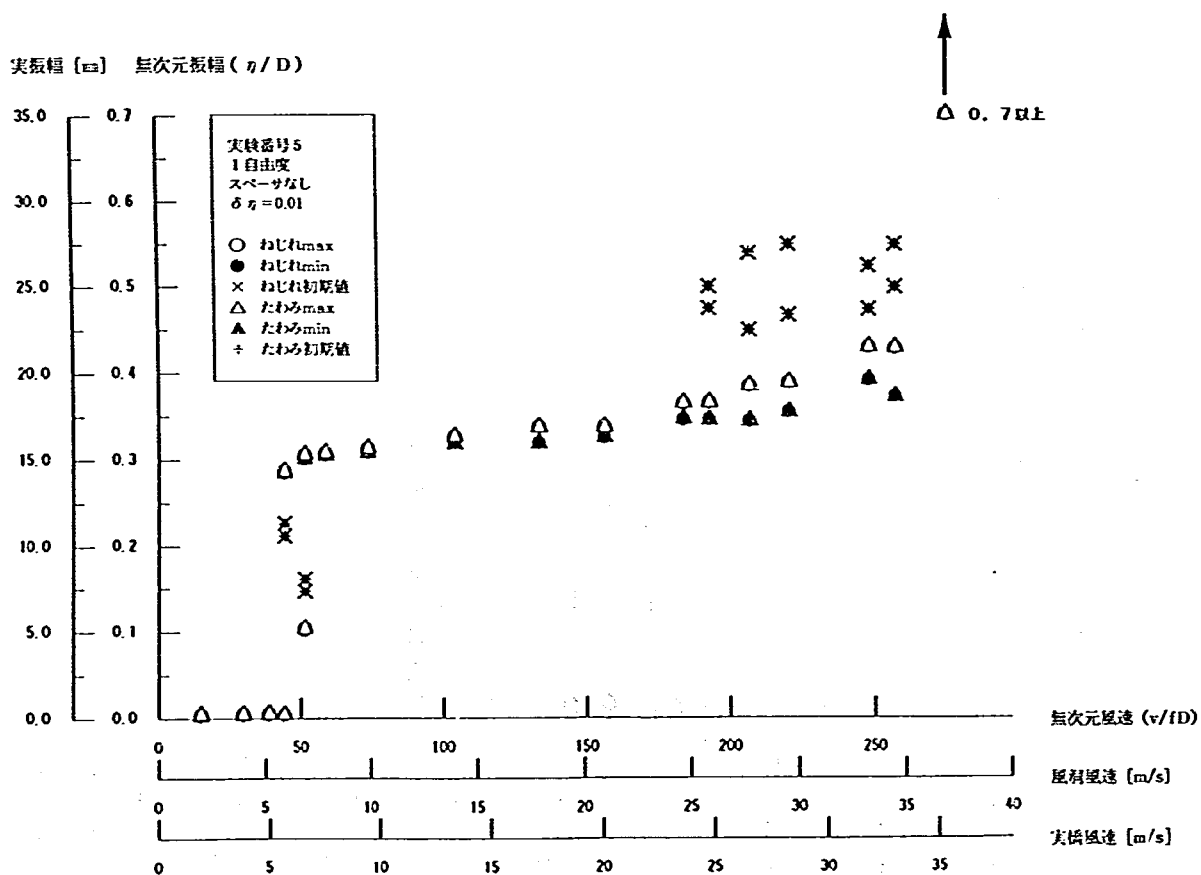
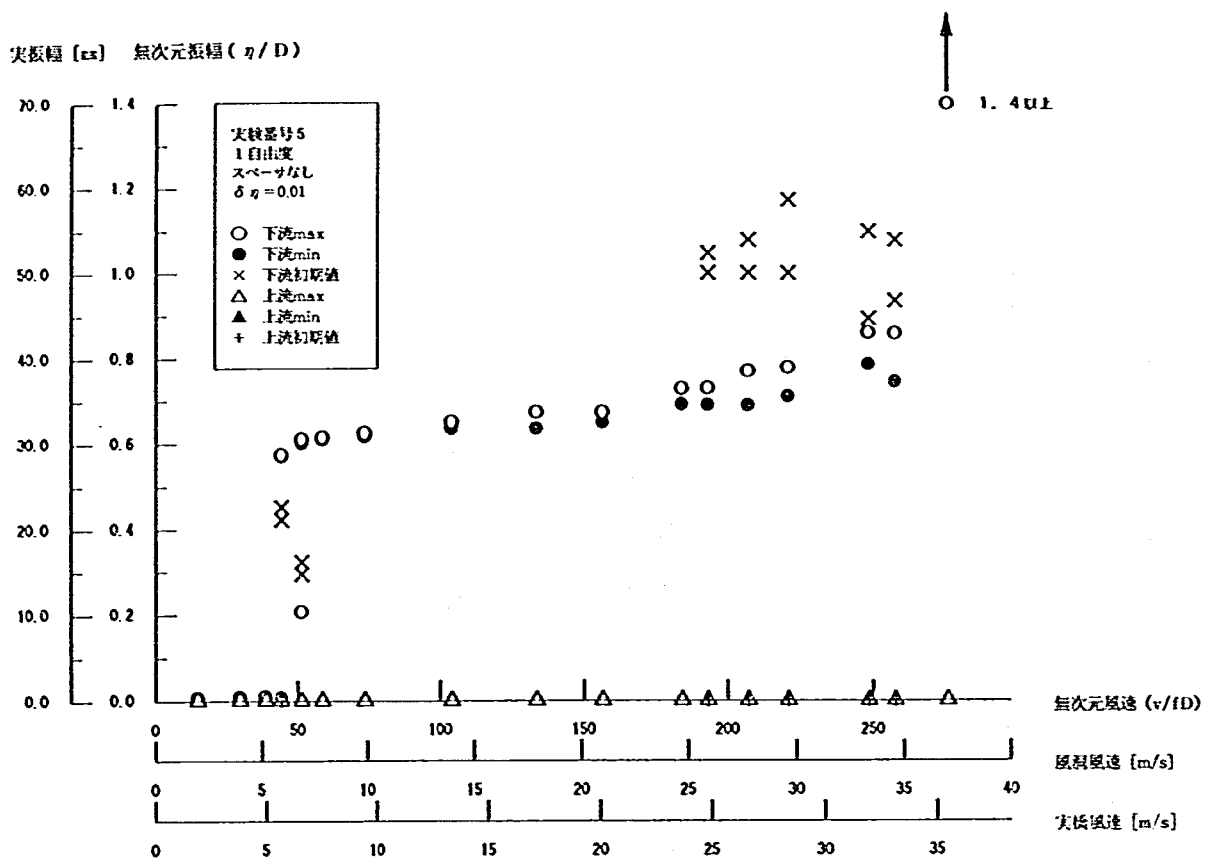
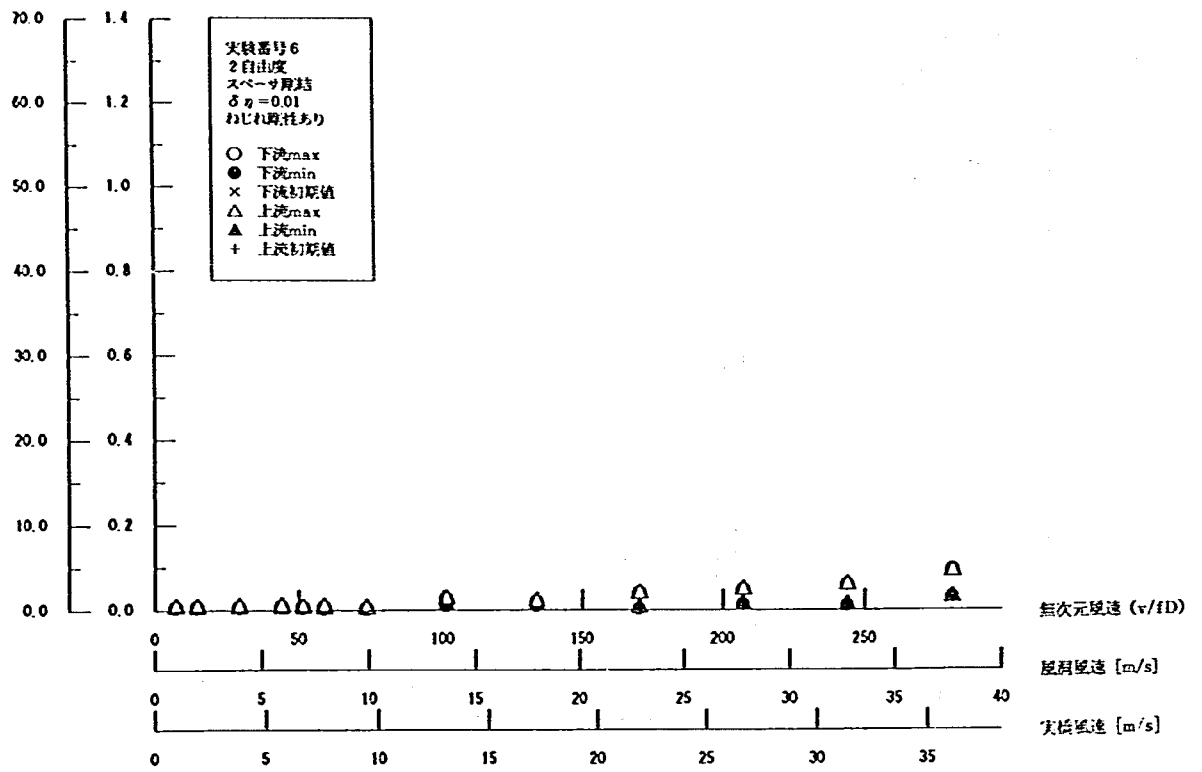


図-4.3.7.6 風速—振幅 曲線

実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)



実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)

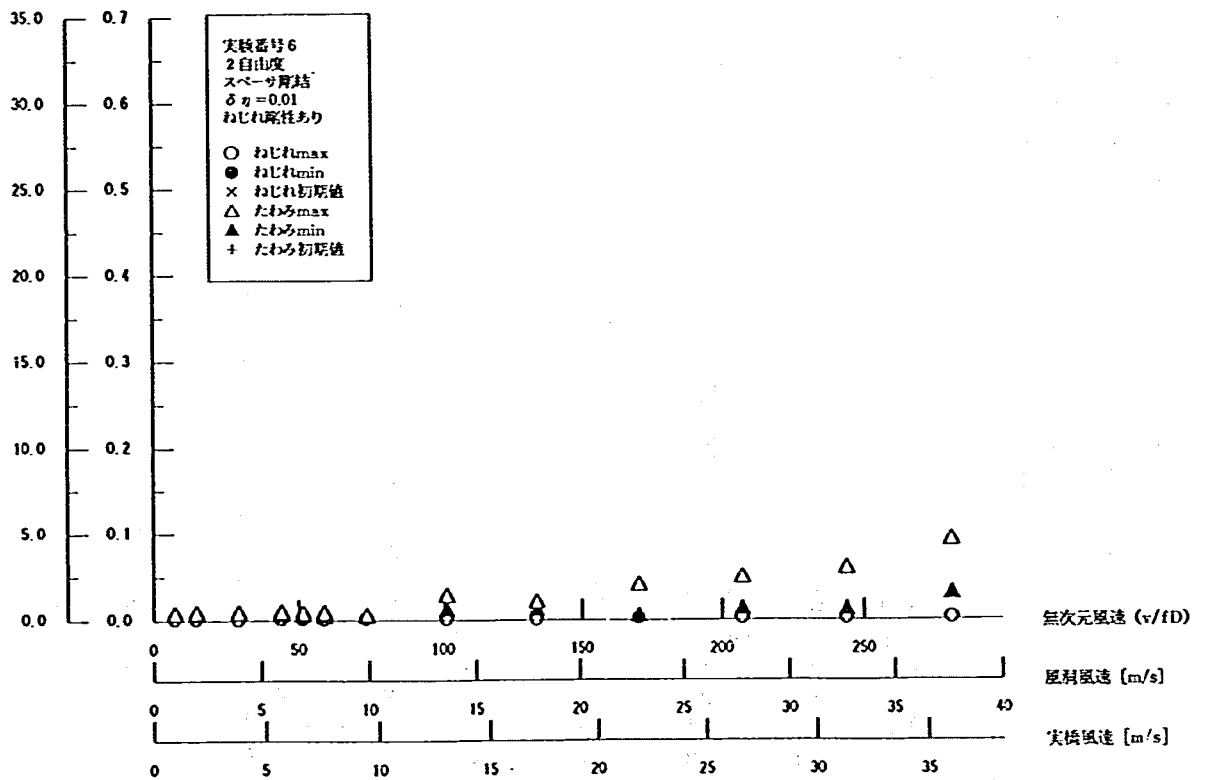
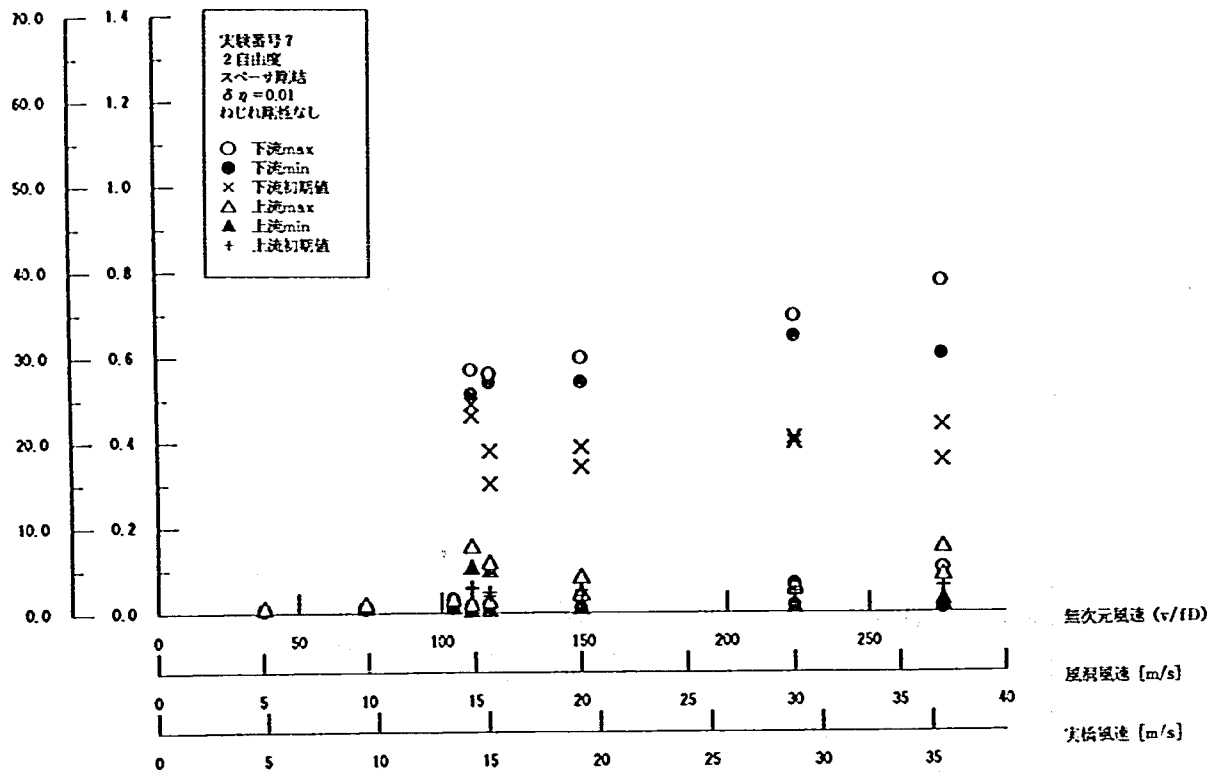


図-4.3.7.7 風速-振幅 曲線

実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)



実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)

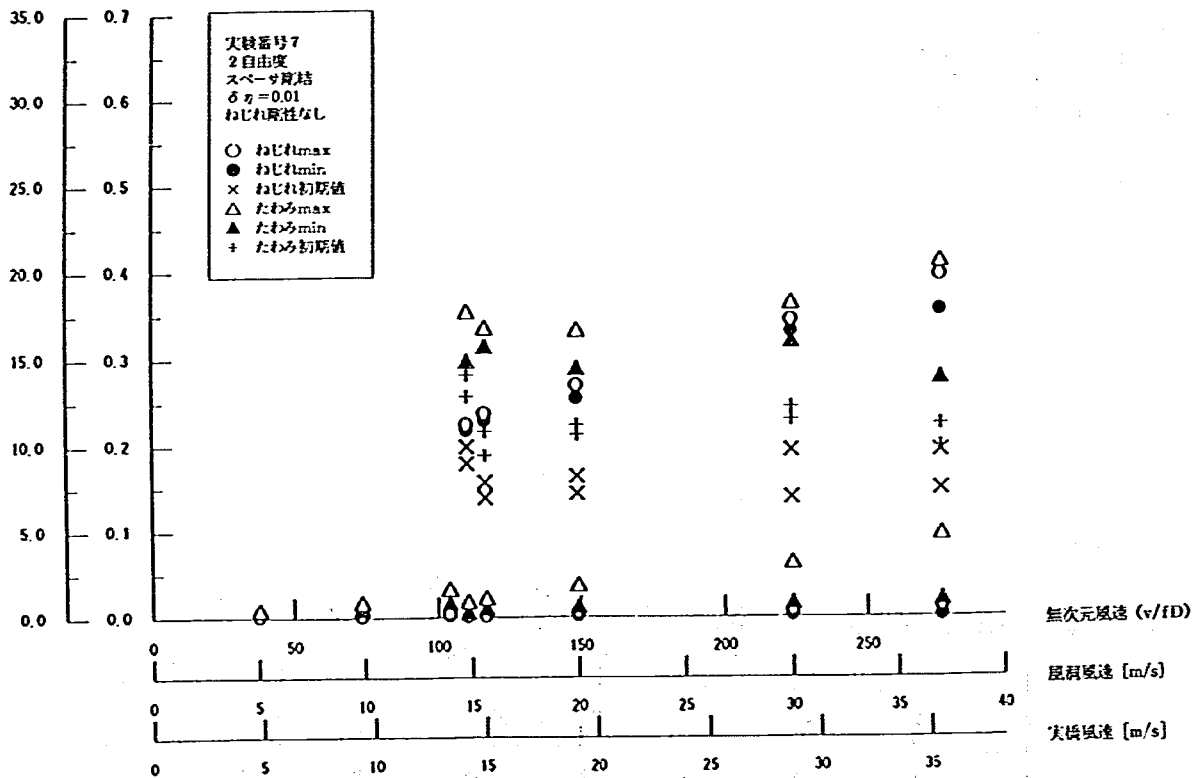
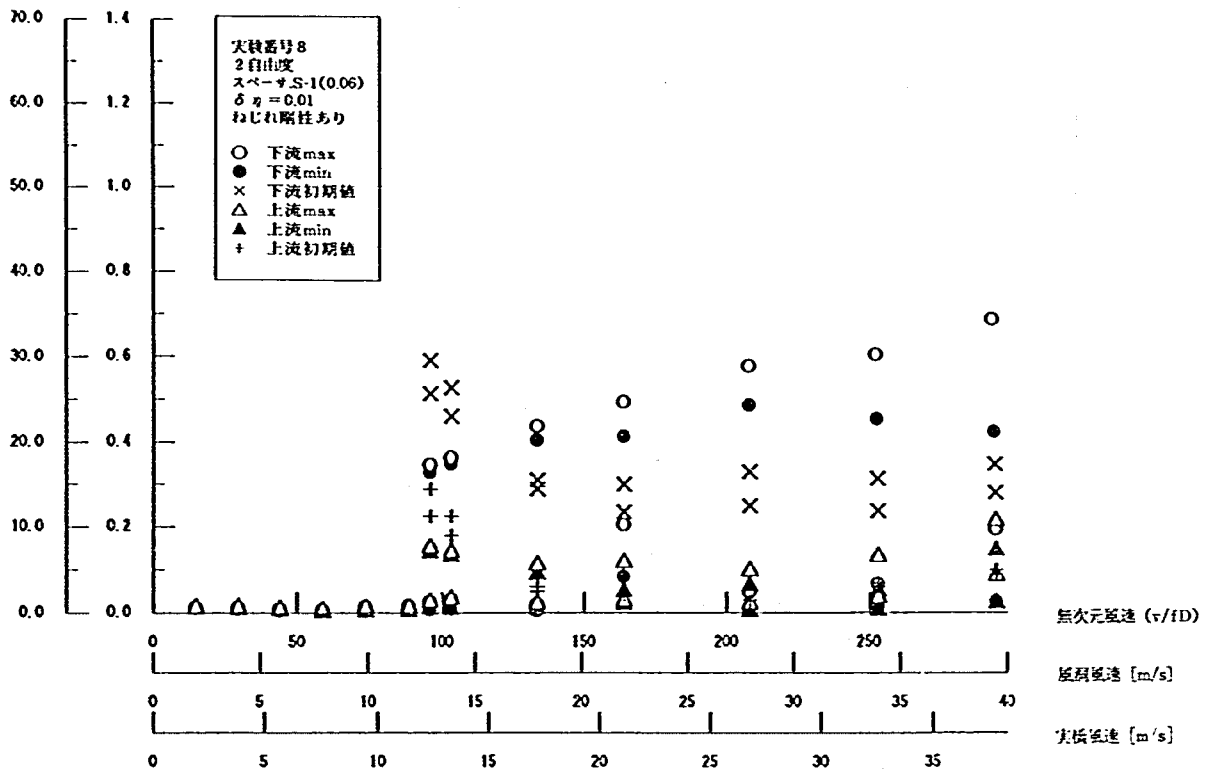


図-4.3.7.8 風速—振幅 曲線

実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)



実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)

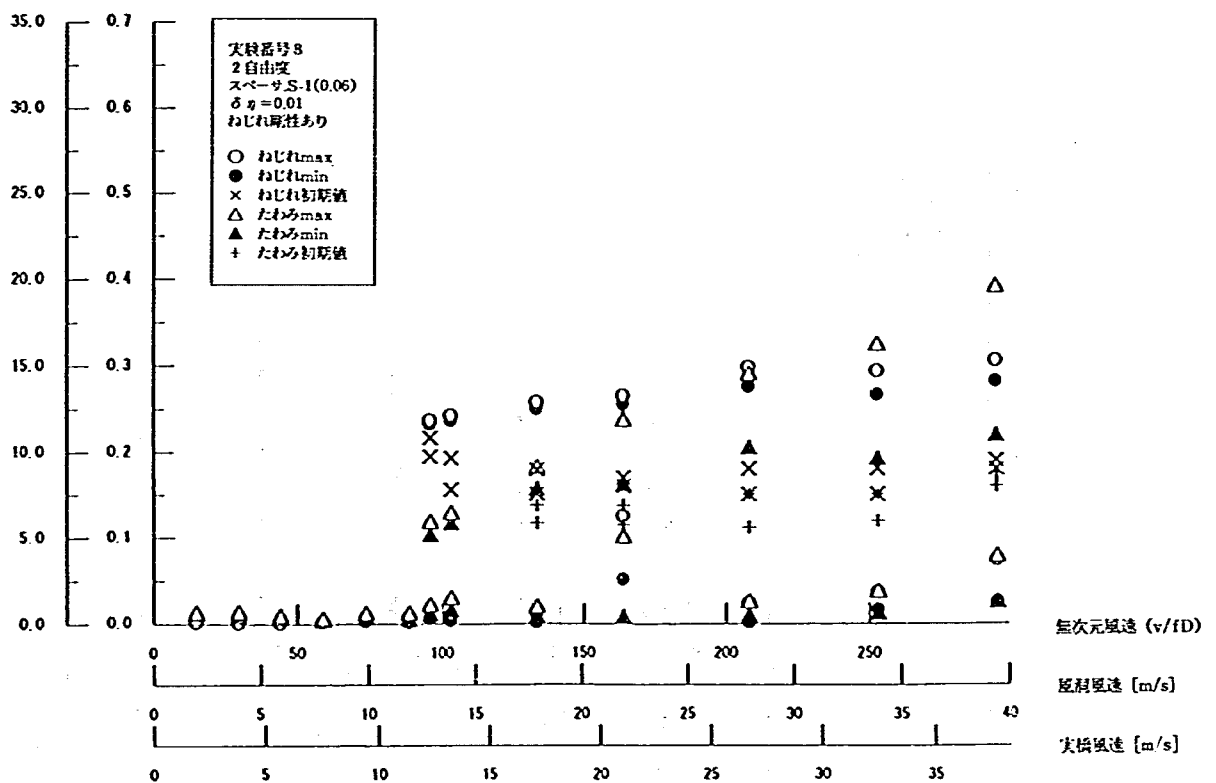
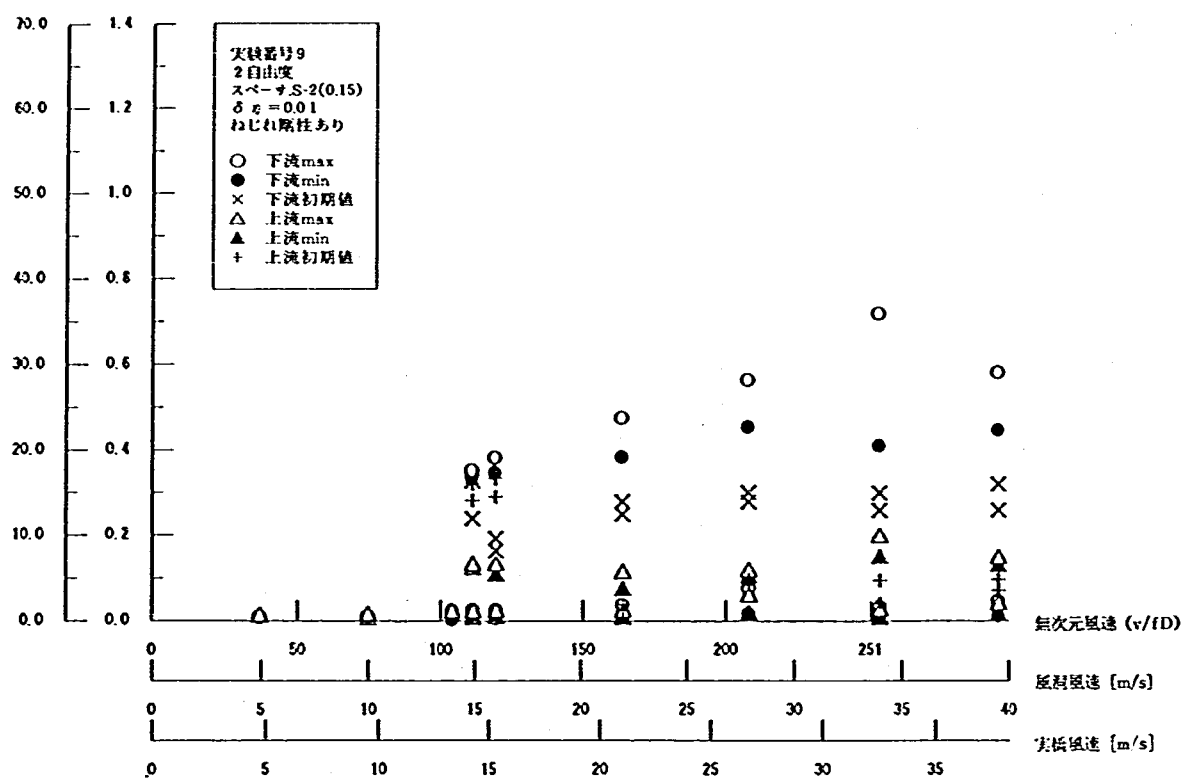


図-4.3.7.9 風速—振幅 曲線

実験番号9 無次元振幅 (η/D)



実験番号9 無次元振幅 (η/D)

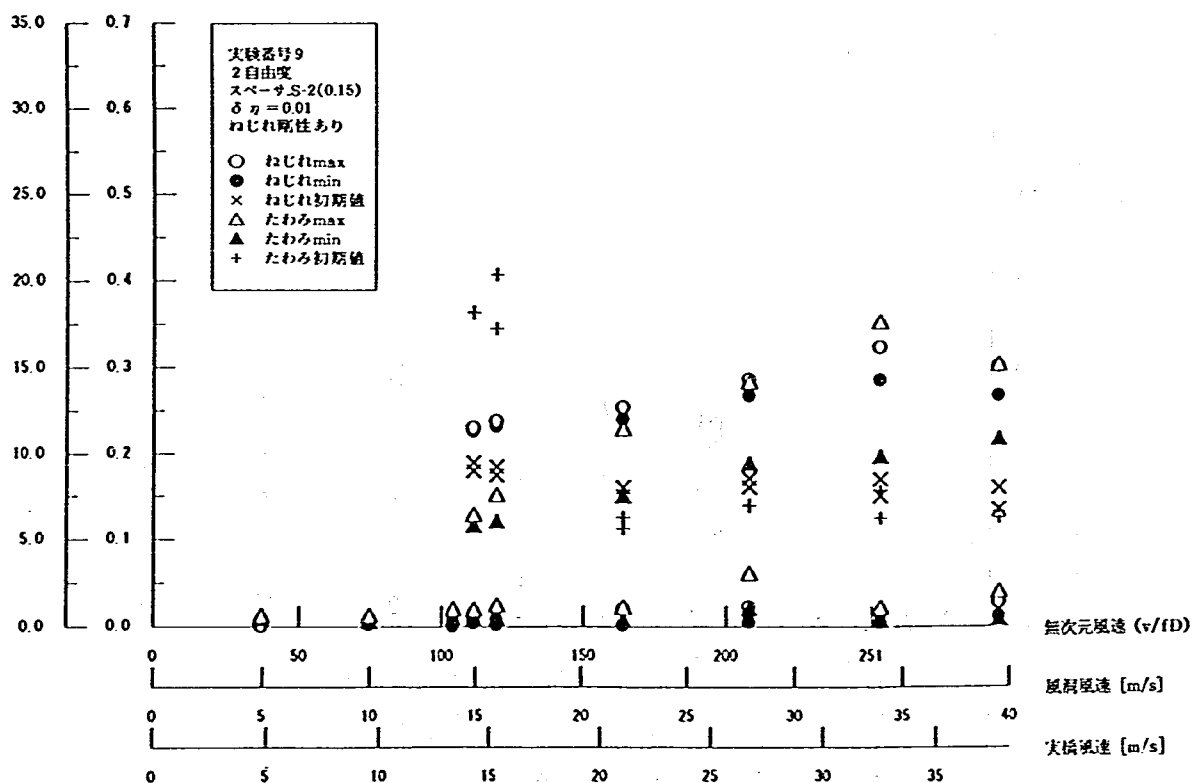
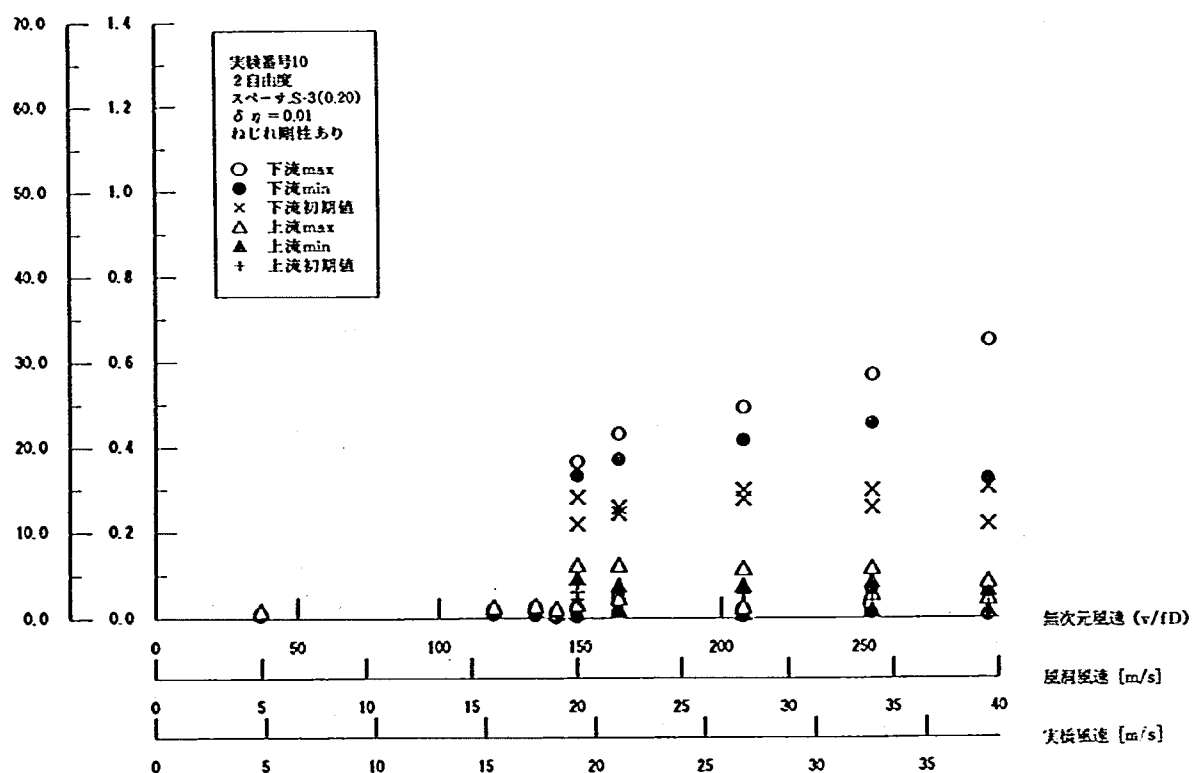


図-4.3.7.10 風速—振幅—曲線

実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)



実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)

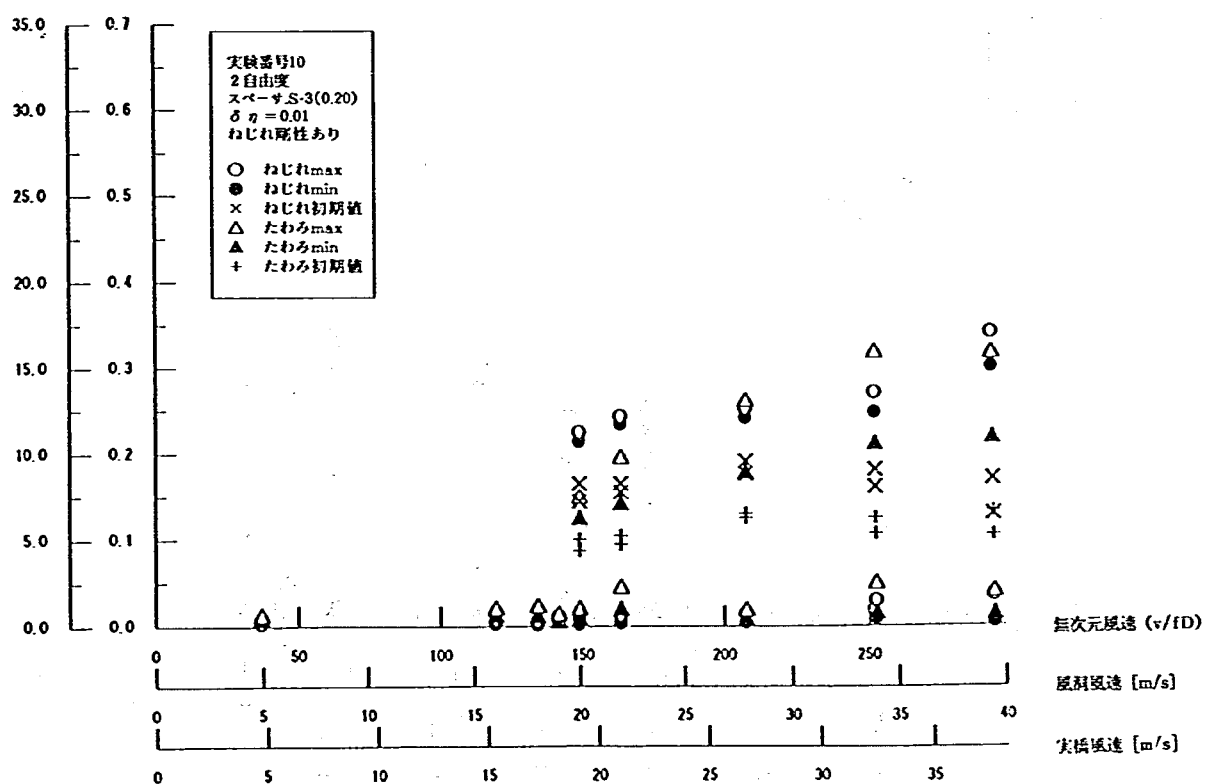
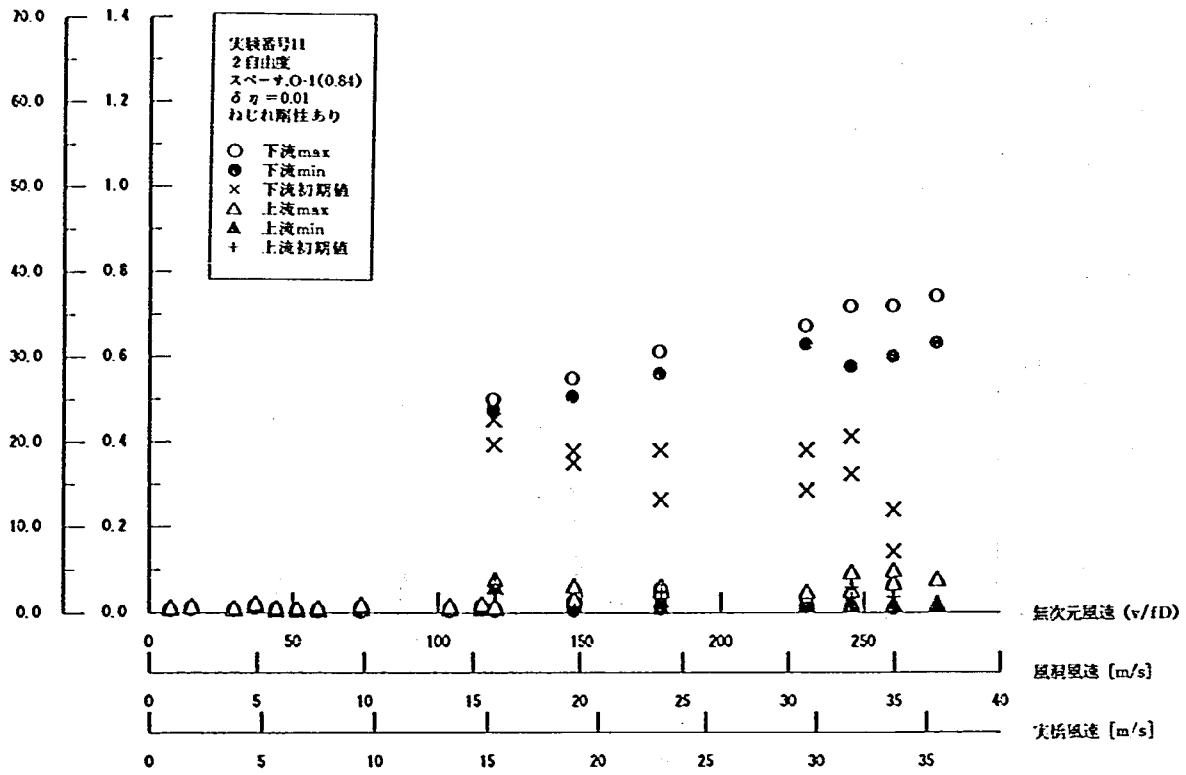


図-4.3.7.11 風速—振幅 曲線

実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)



実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)

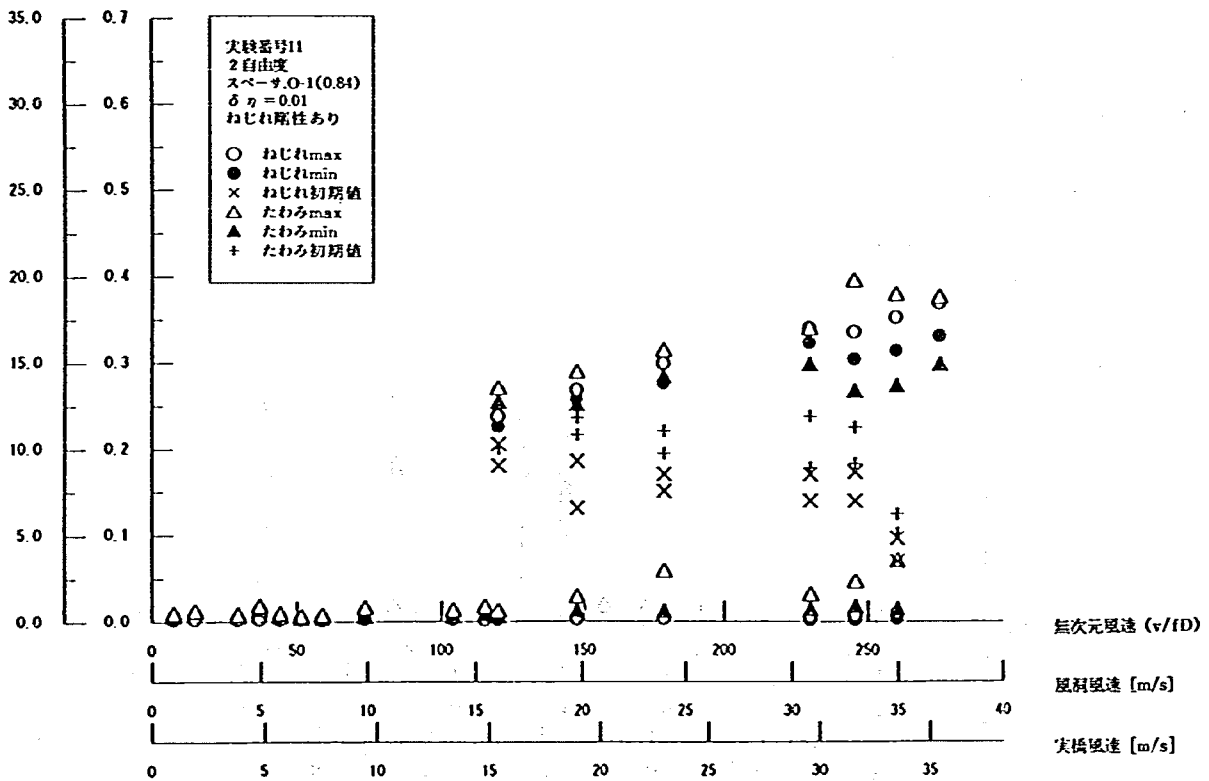
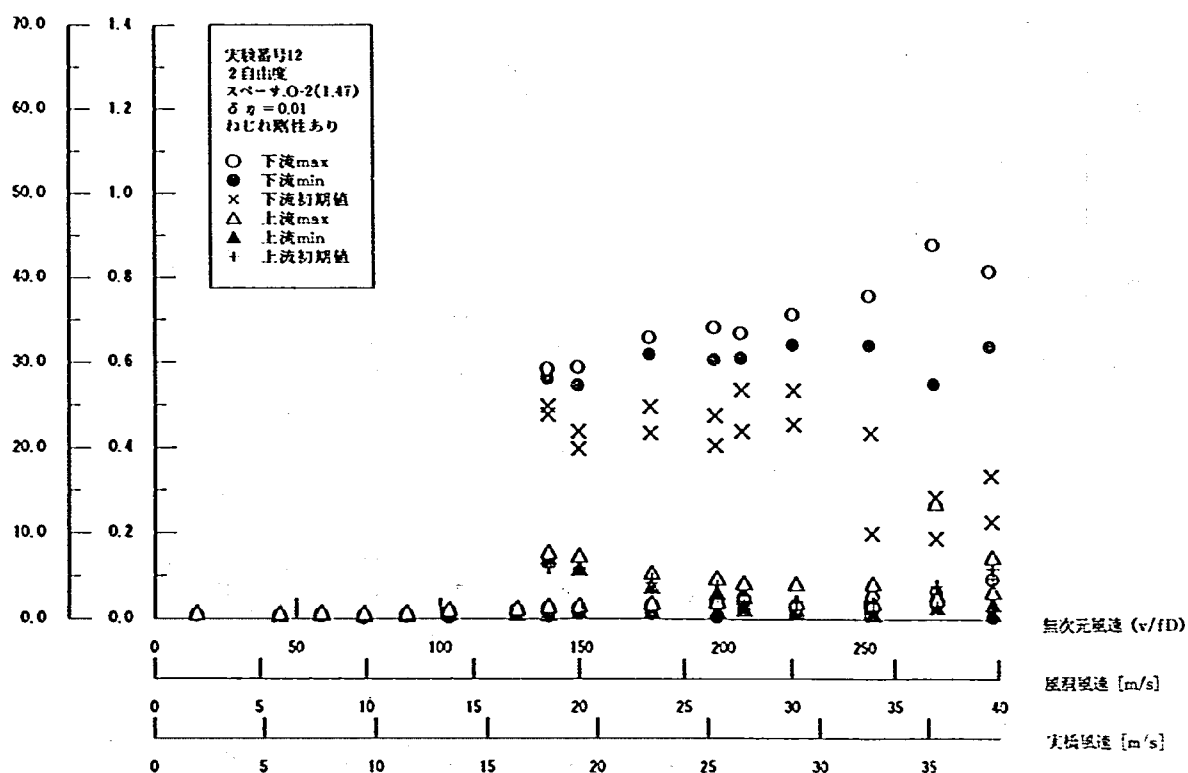


図-4.3.7.12 風速—振幅—曲線

実振幅 [cm] 無次元振幅 (η/D)



実振幅 [cm] 無次元振幅 (η/D)

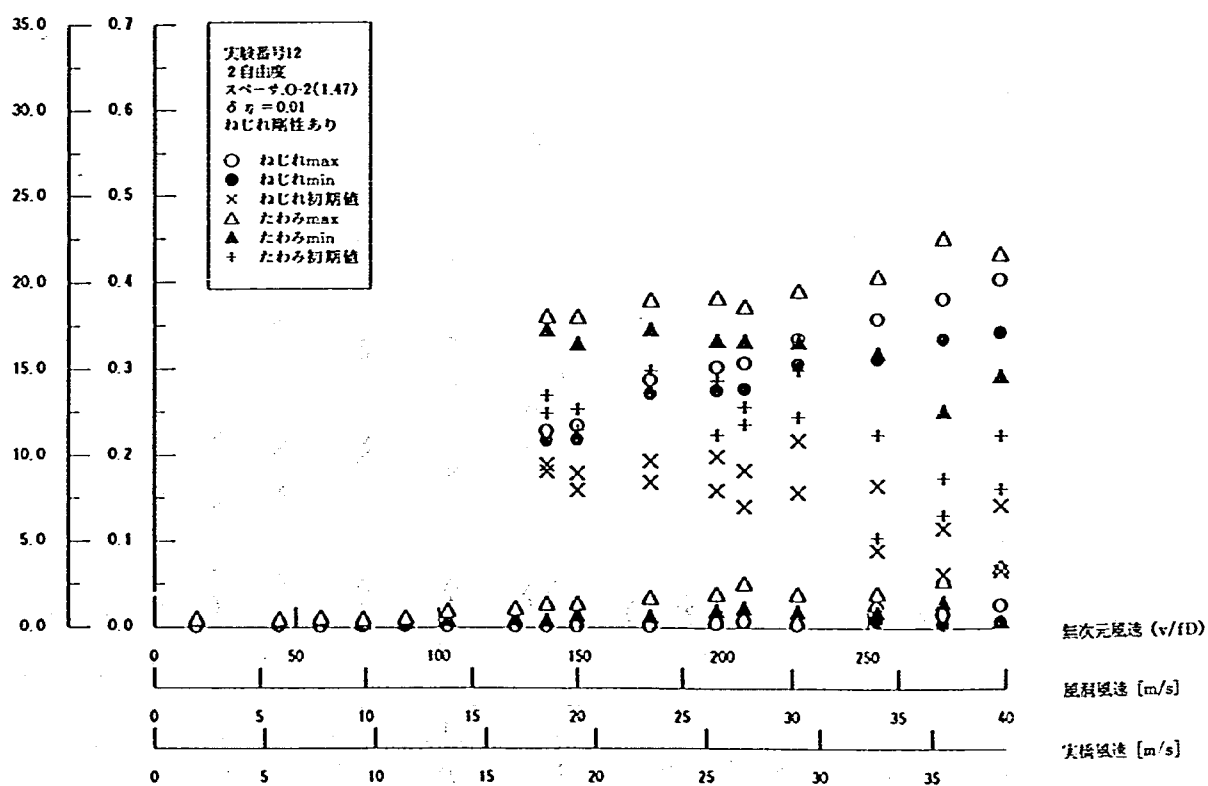
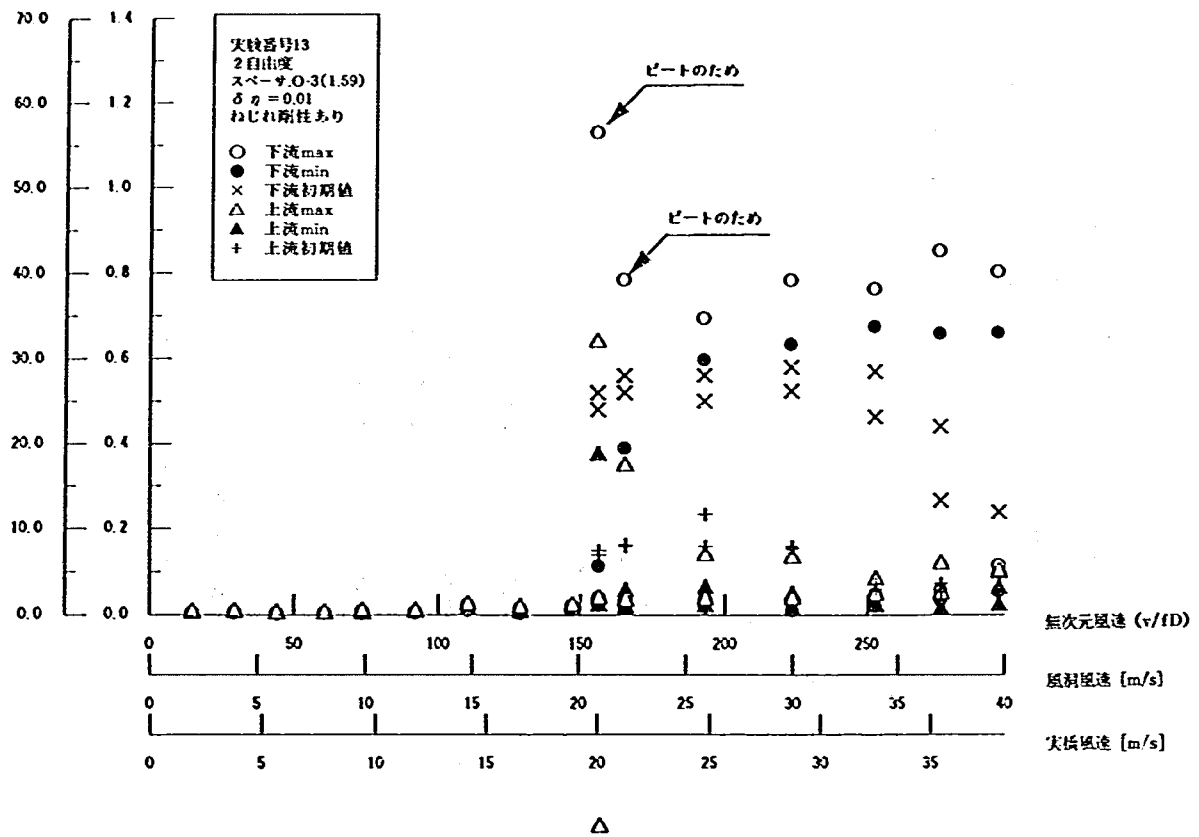


図-4.3.7.13 風速-振幅 曲線

実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)



実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)

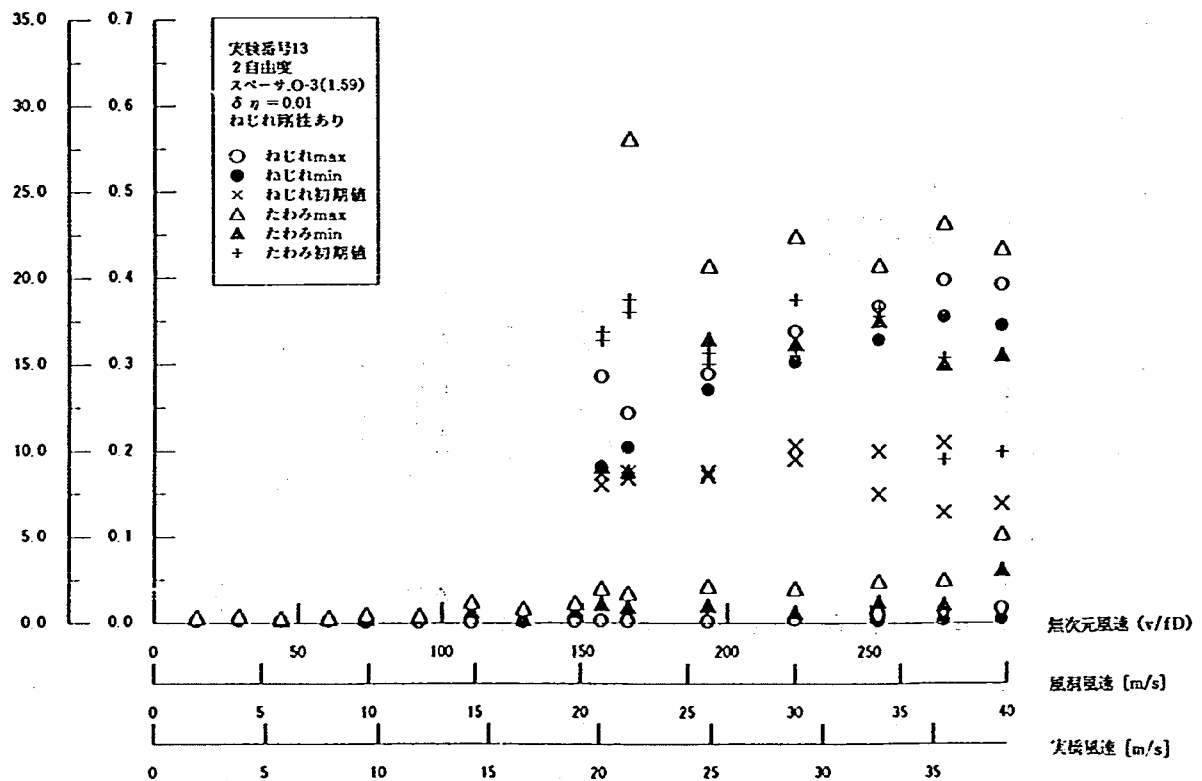
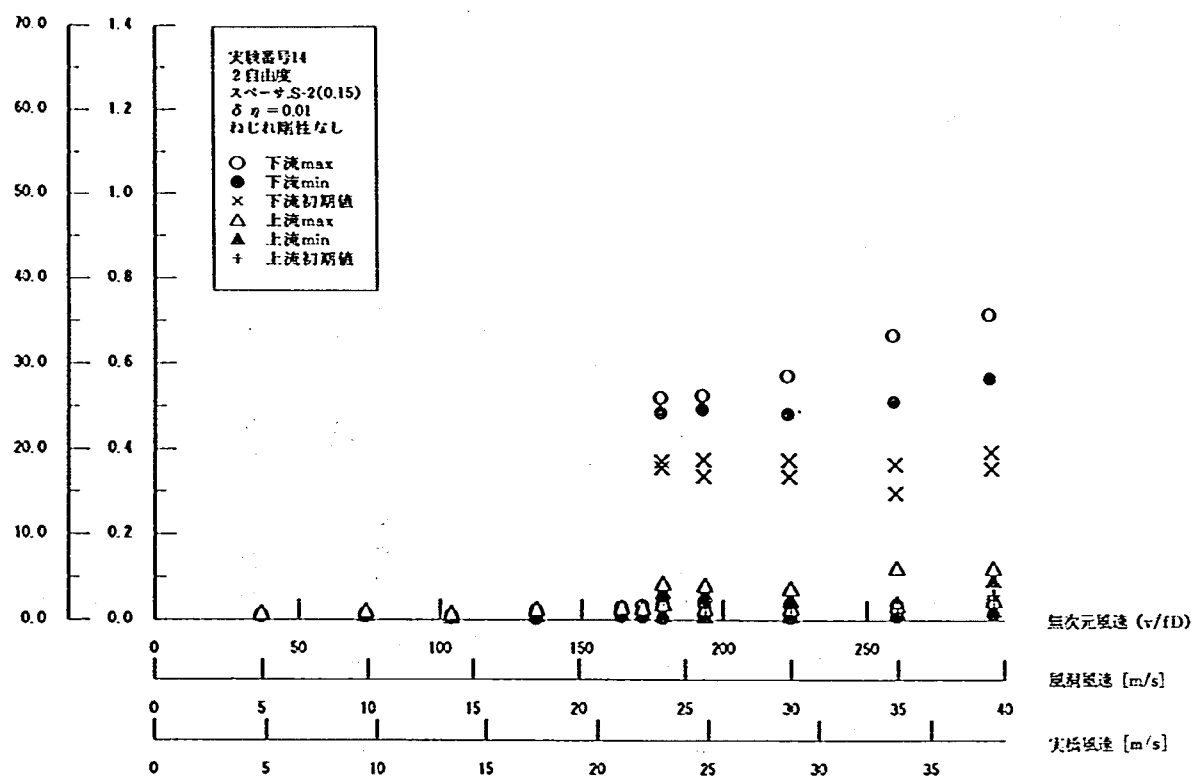


図-4.3.7.14 風速—振幅—曲線

実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)



実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)

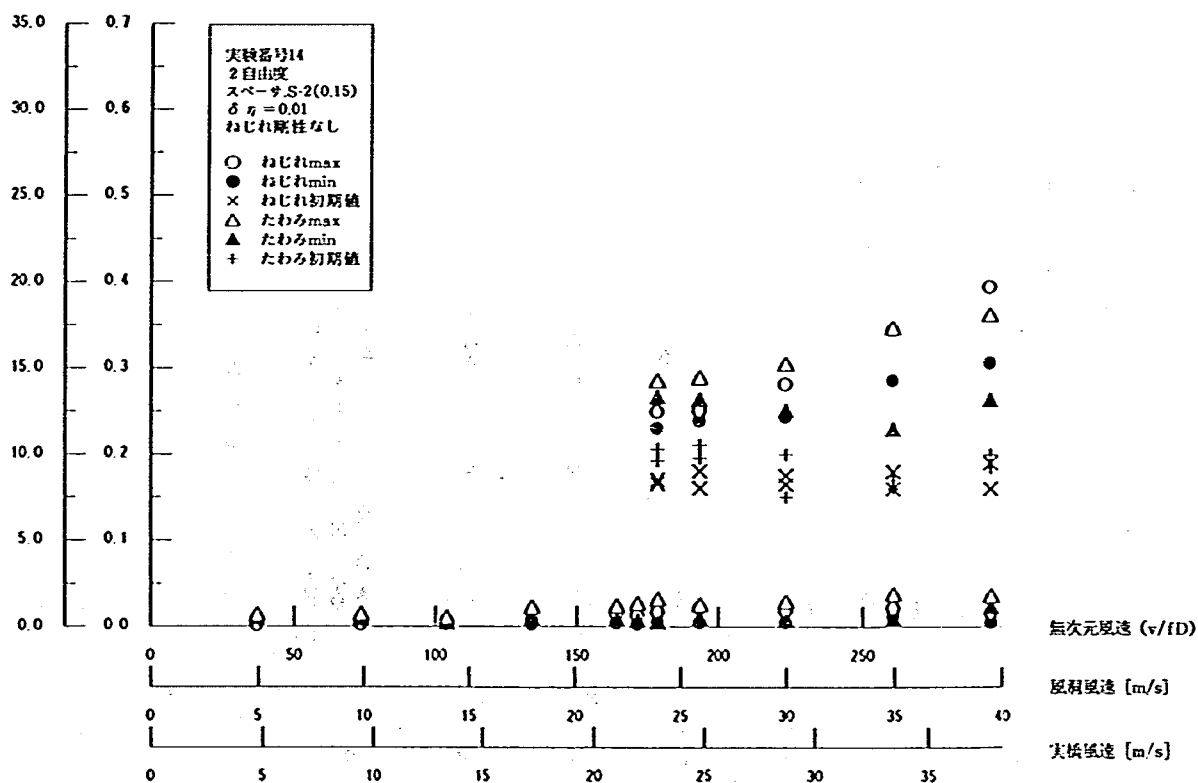
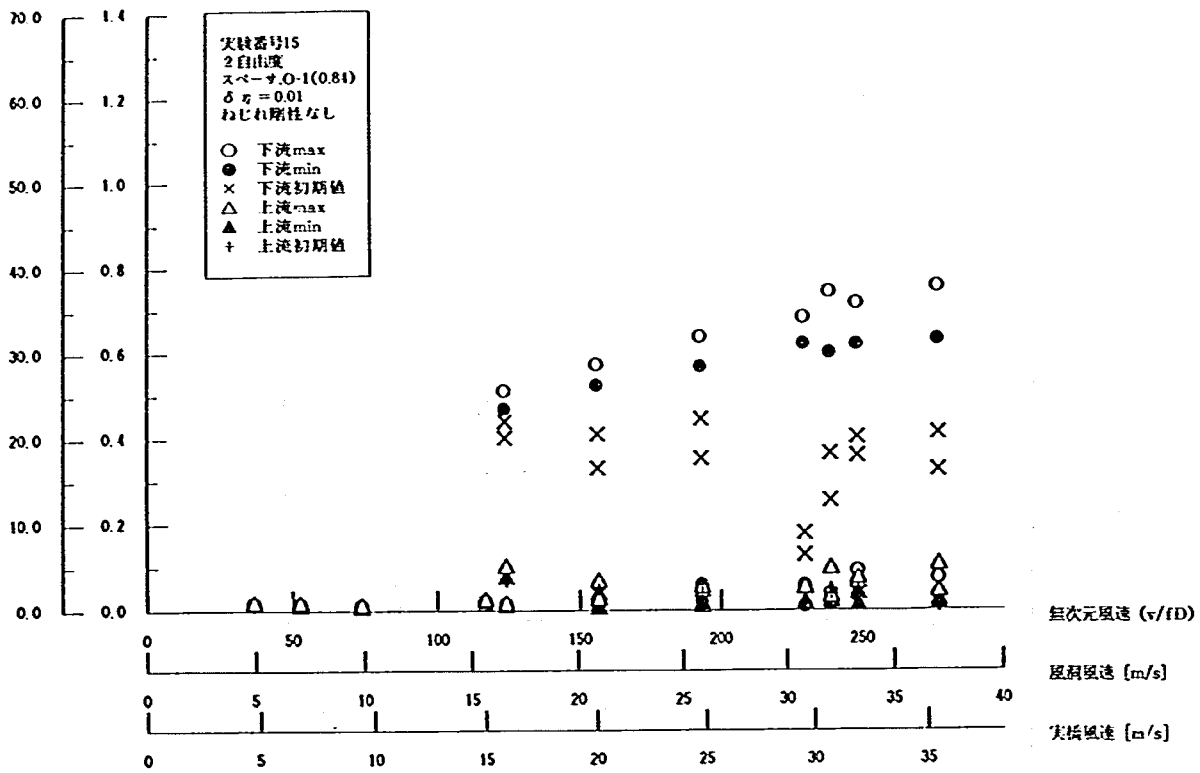


図-4.3.7.15 風速-振幅 曲線

実振幅 [cm] 無次元振幅 (η/D)



実振幅 [cm] 無次元振幅 (η/D)

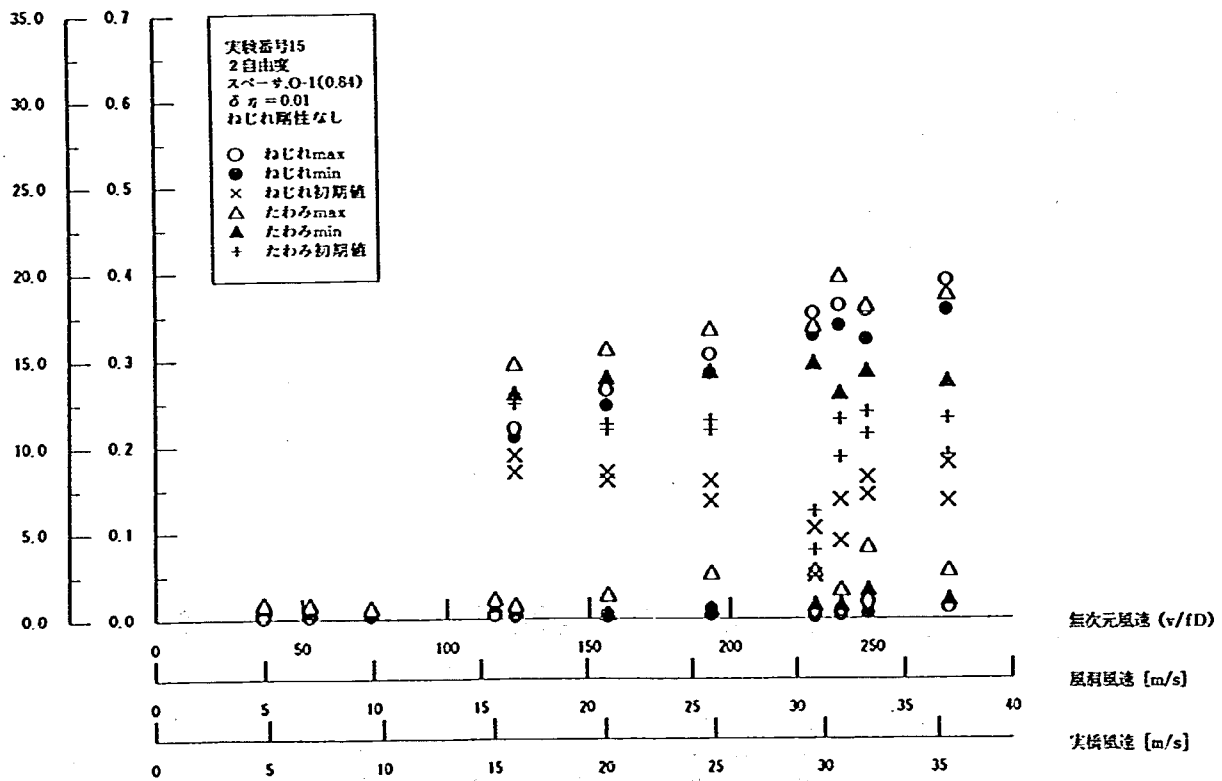
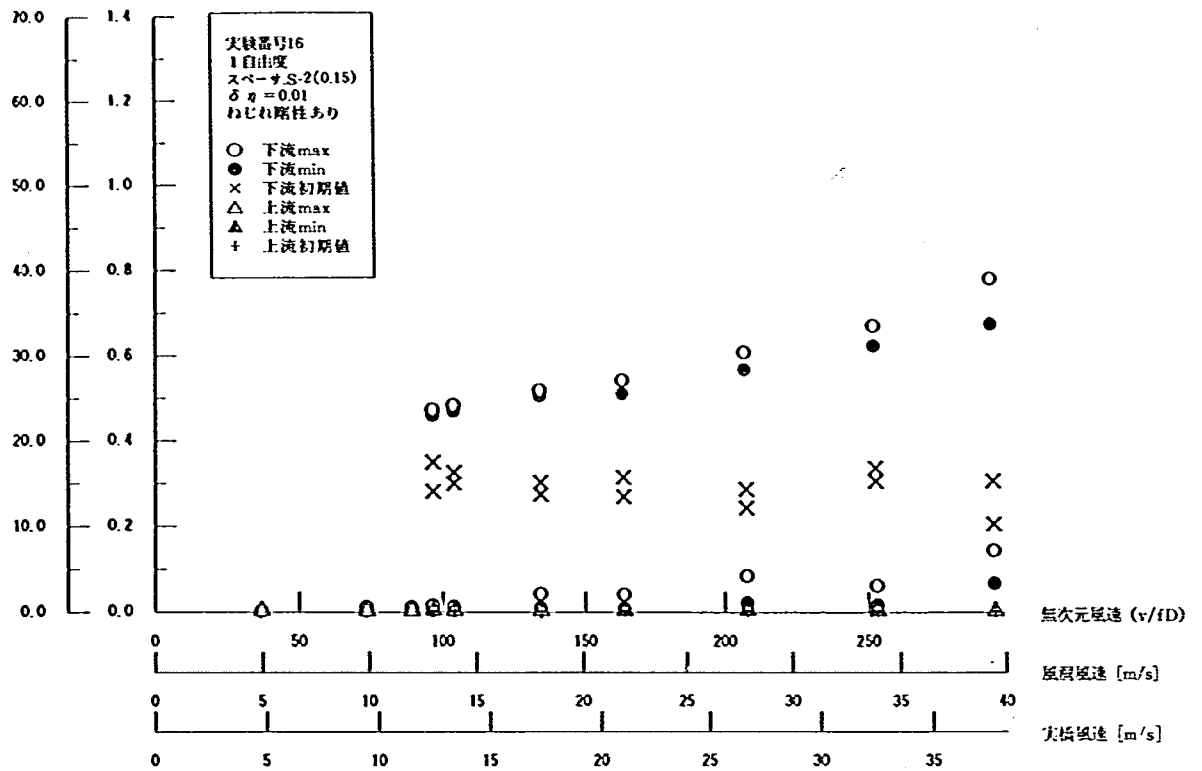


図-4.3.7.16 風速-振幅 曲線

実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)



実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)

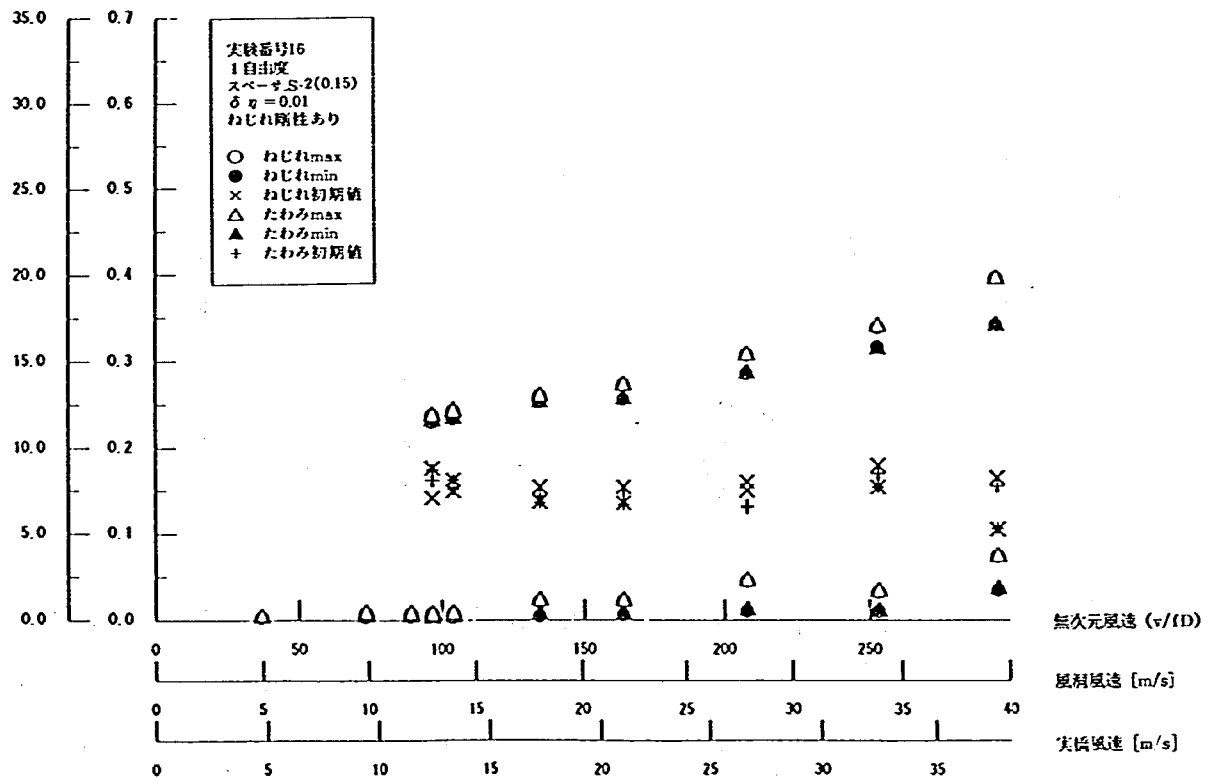
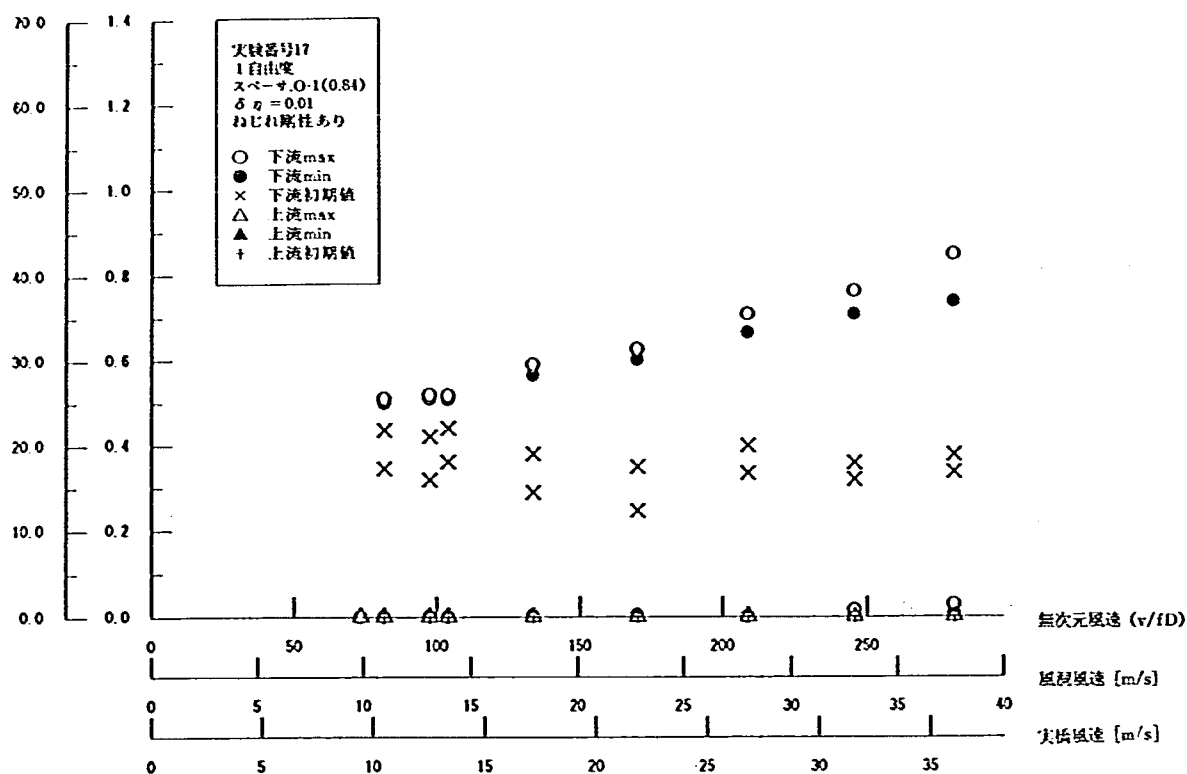


図-4.3.7.17 風速一振幅 曲線

実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)



実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)

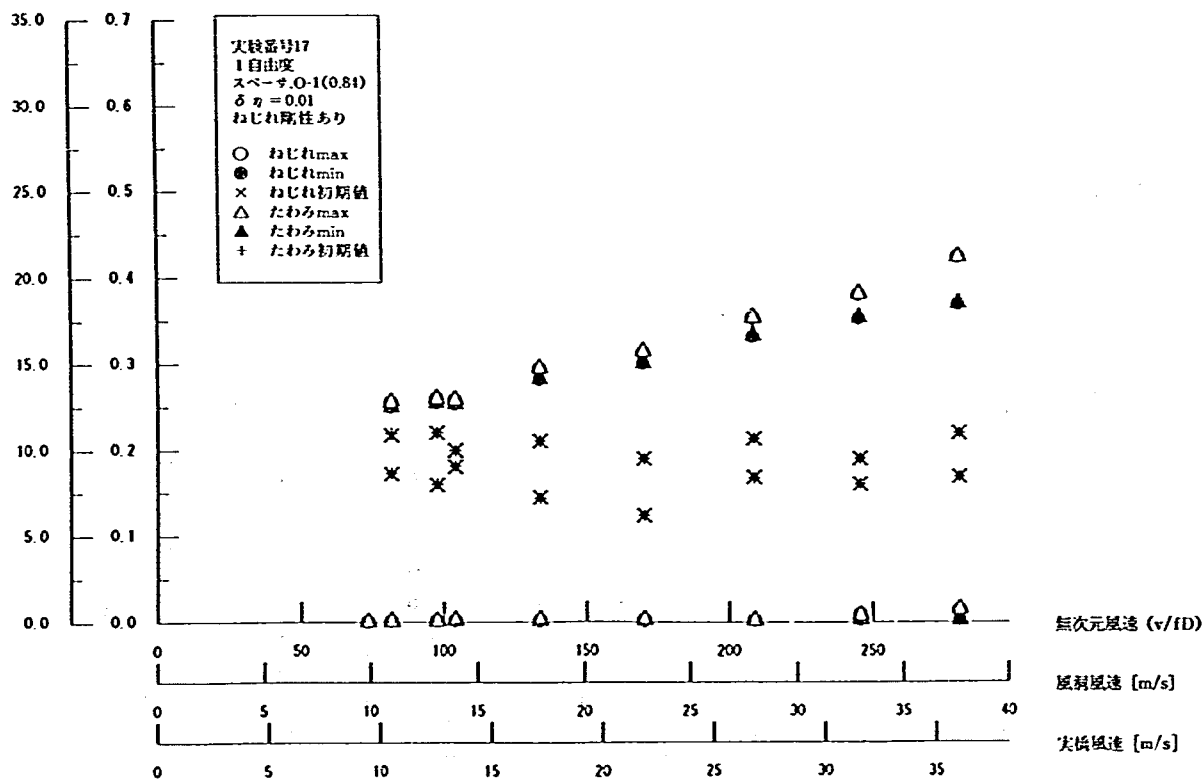
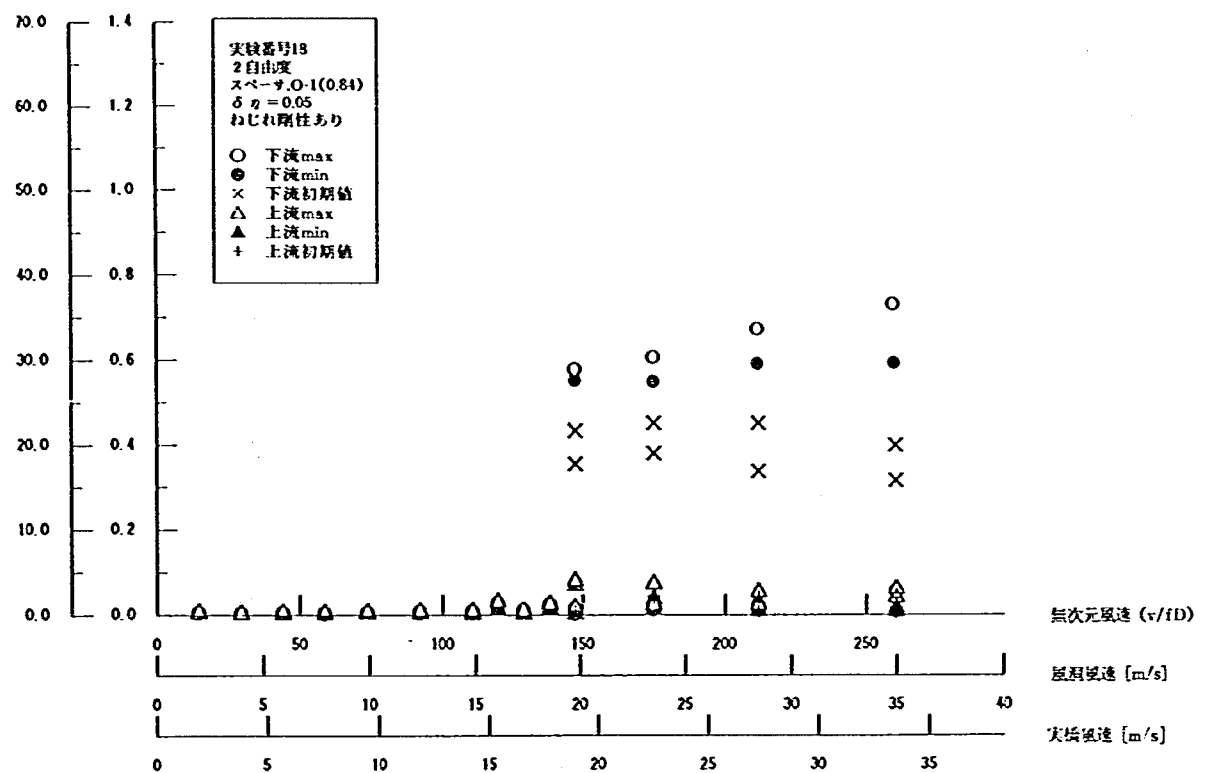


図-4.3.7.18 風速—振幅—曲線

実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)



実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)

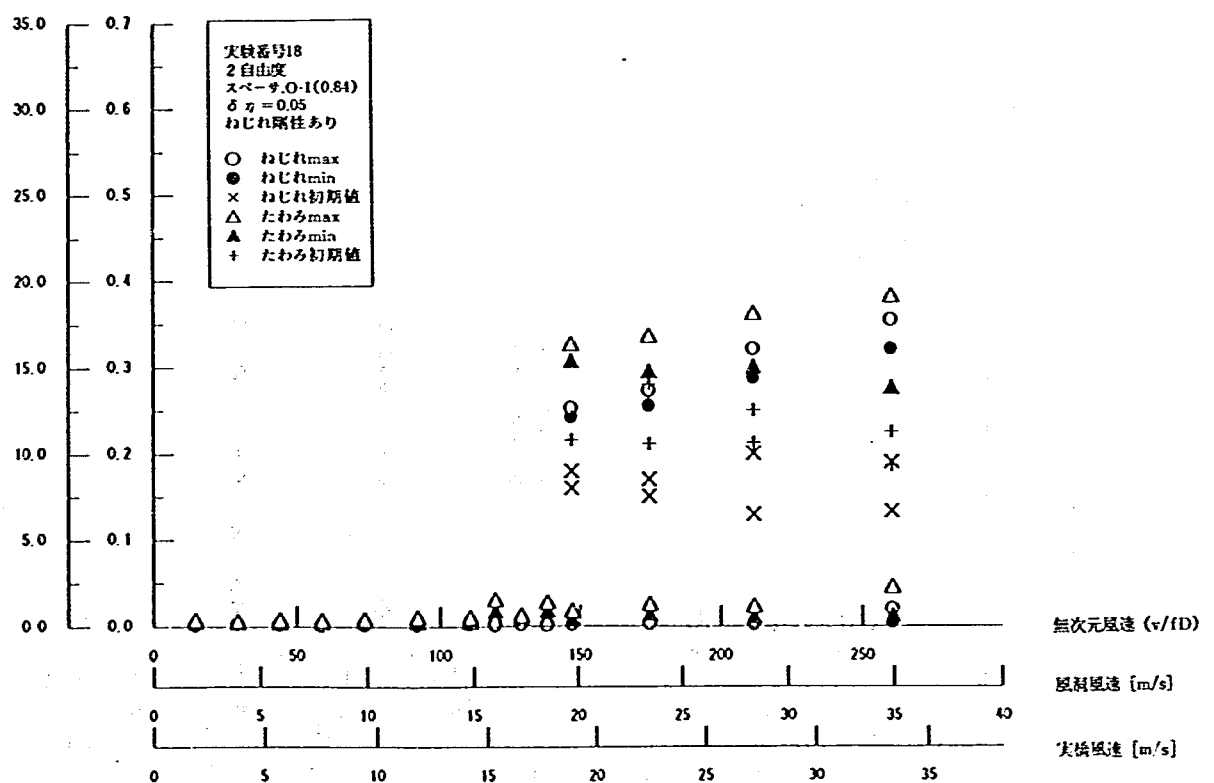
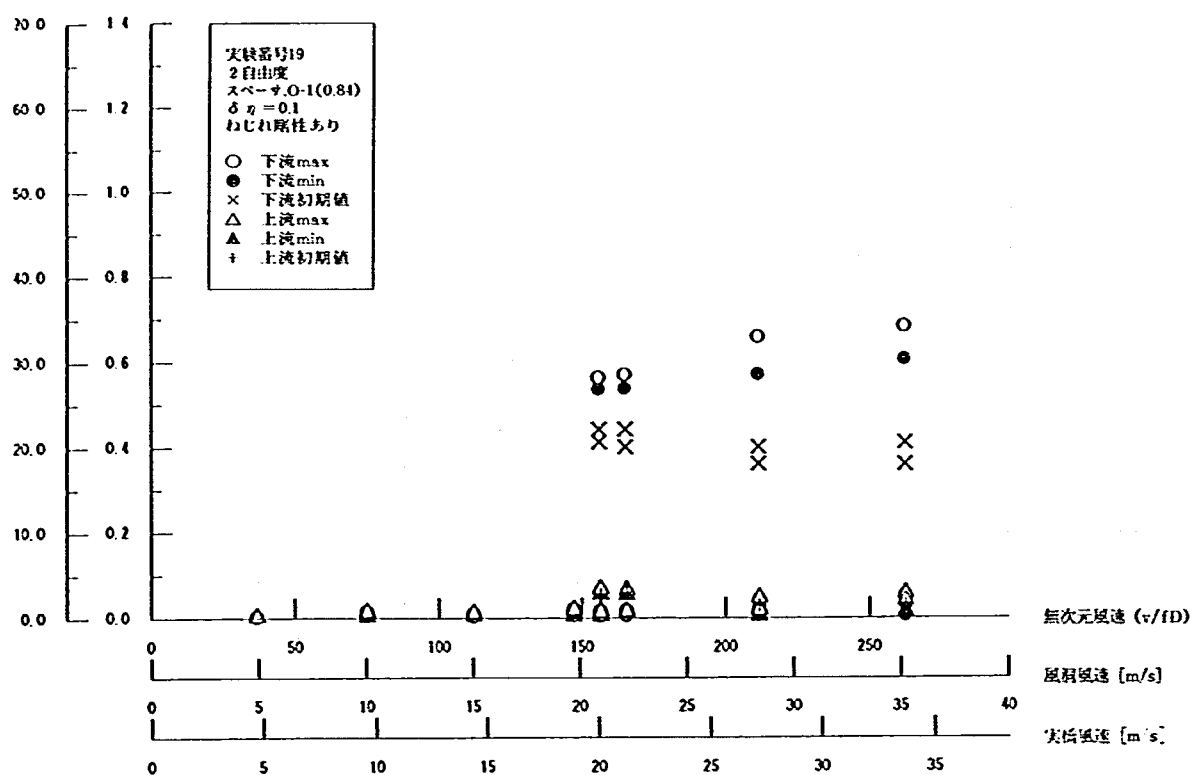


図-4.3.7.19 風速—振幅 曲線

実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)



実振幅 [mm] 無次元振幅 (η/D)

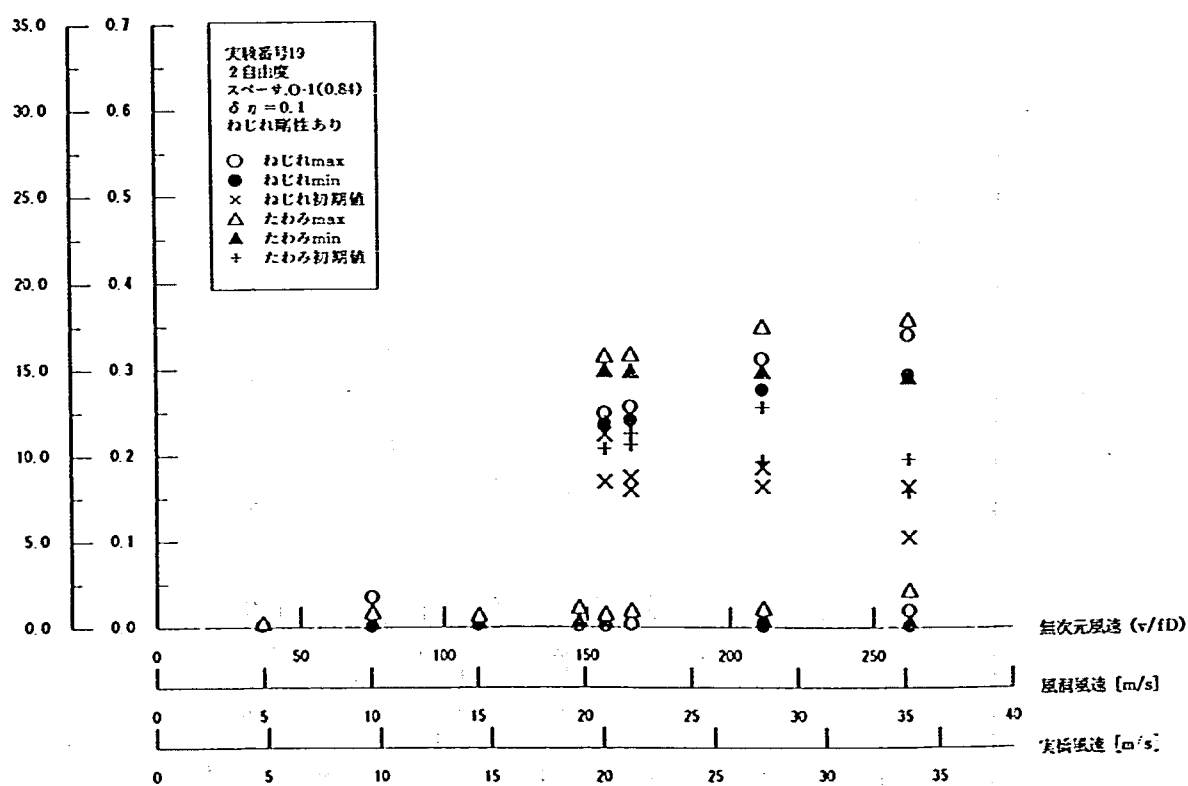
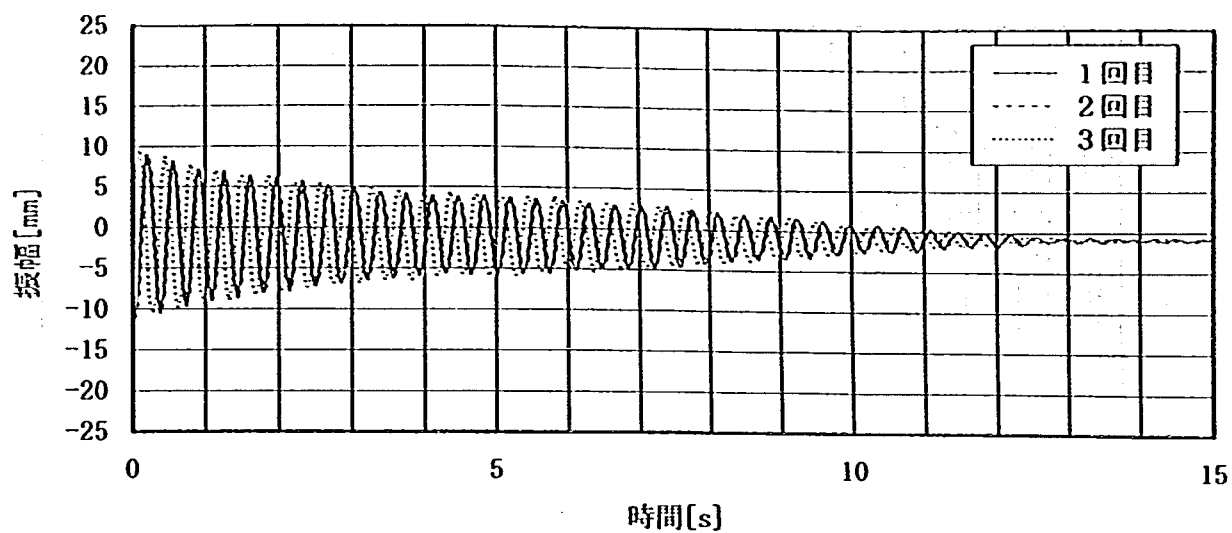
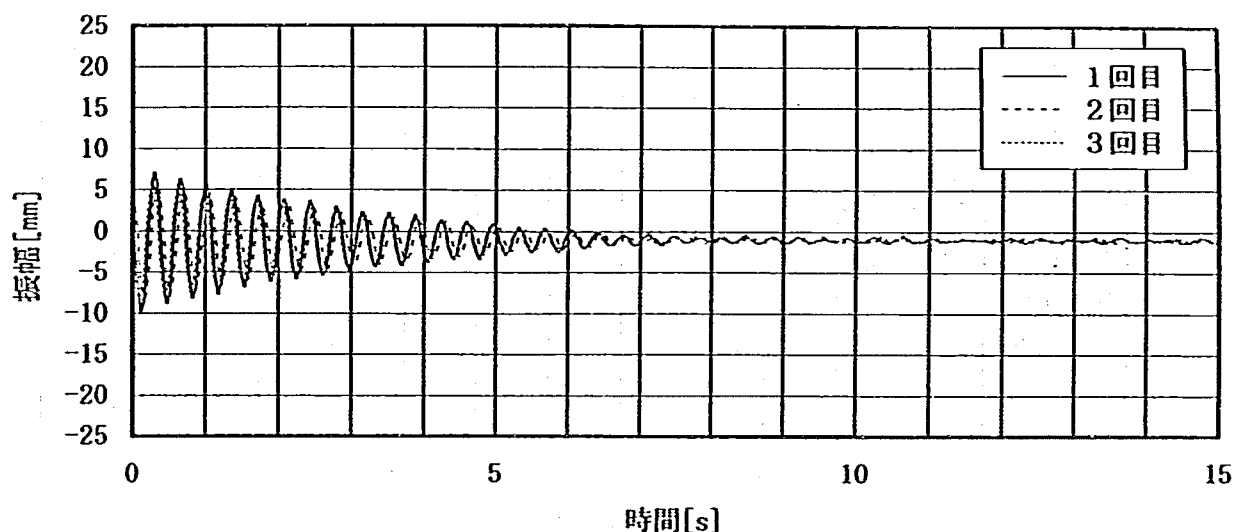


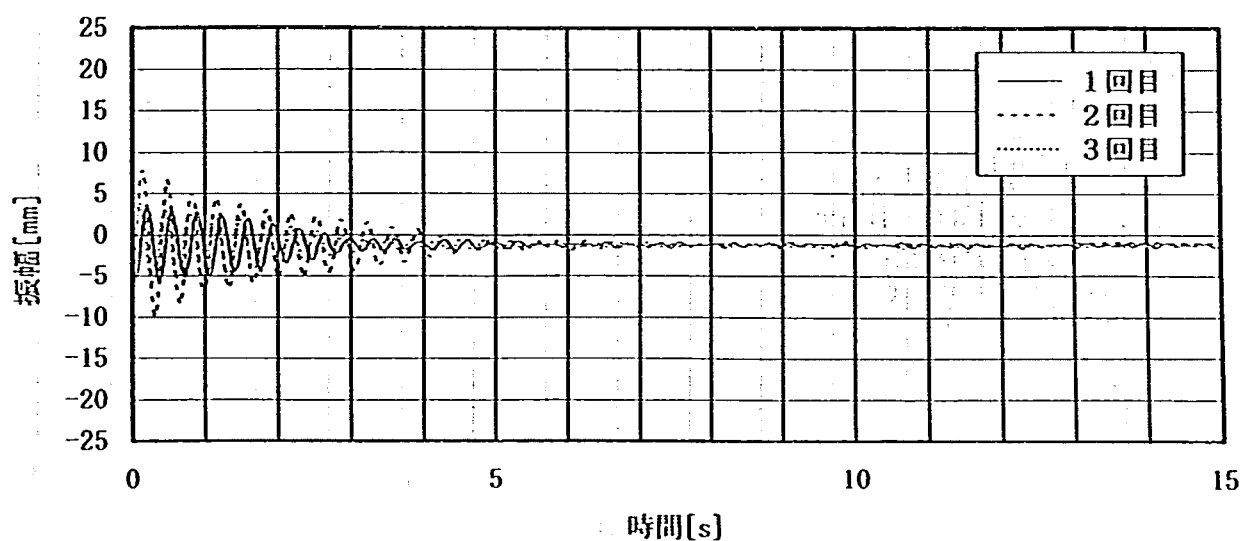
図-4.3.7.20 風速-振幅 曲線



実験番号 8 S-1 (対数減衰率: 0.06)



実験番号 9 S-2 (対数減衰率: 0.15)



実験番号 10 S-3 (対数減衰率: 0.20)

図-4.3.7.21 減衰波形

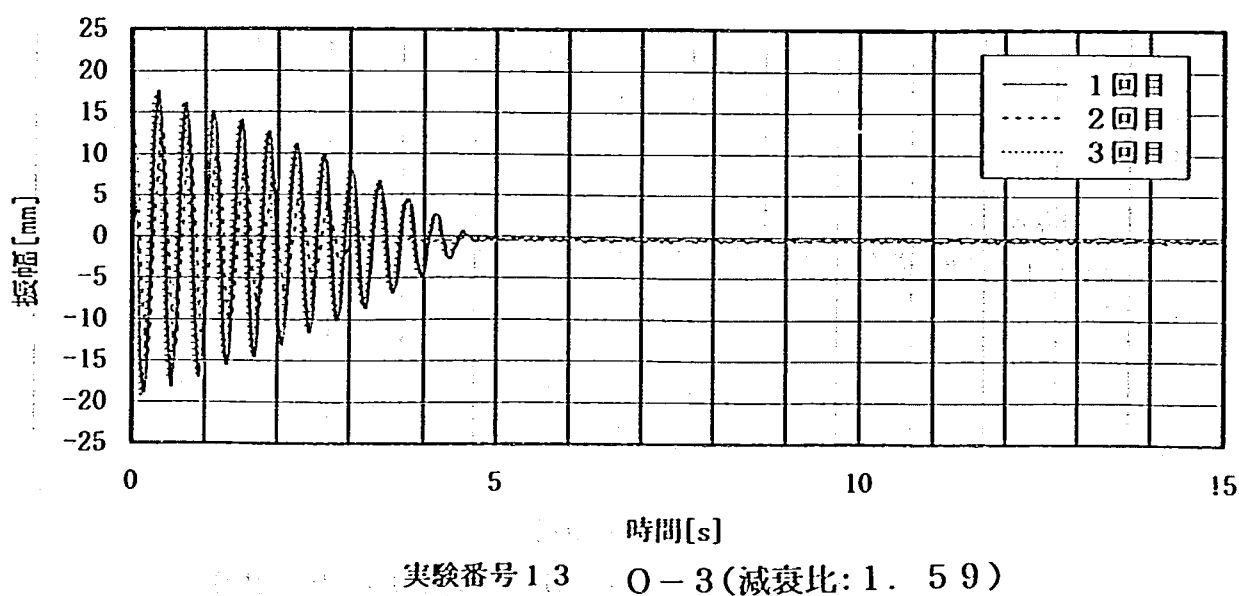
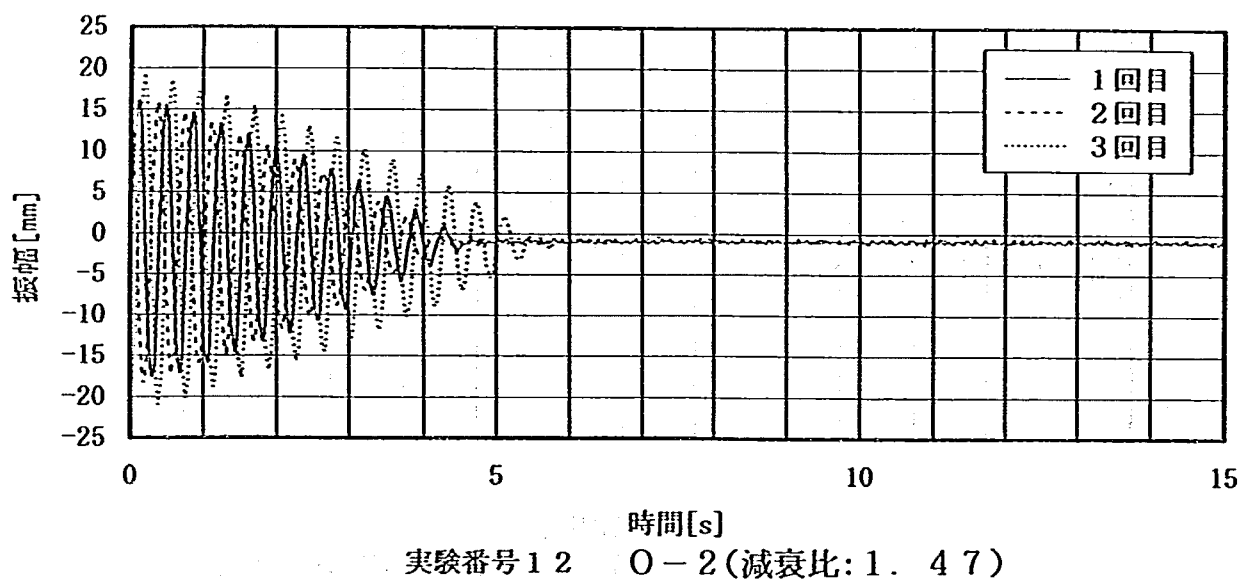
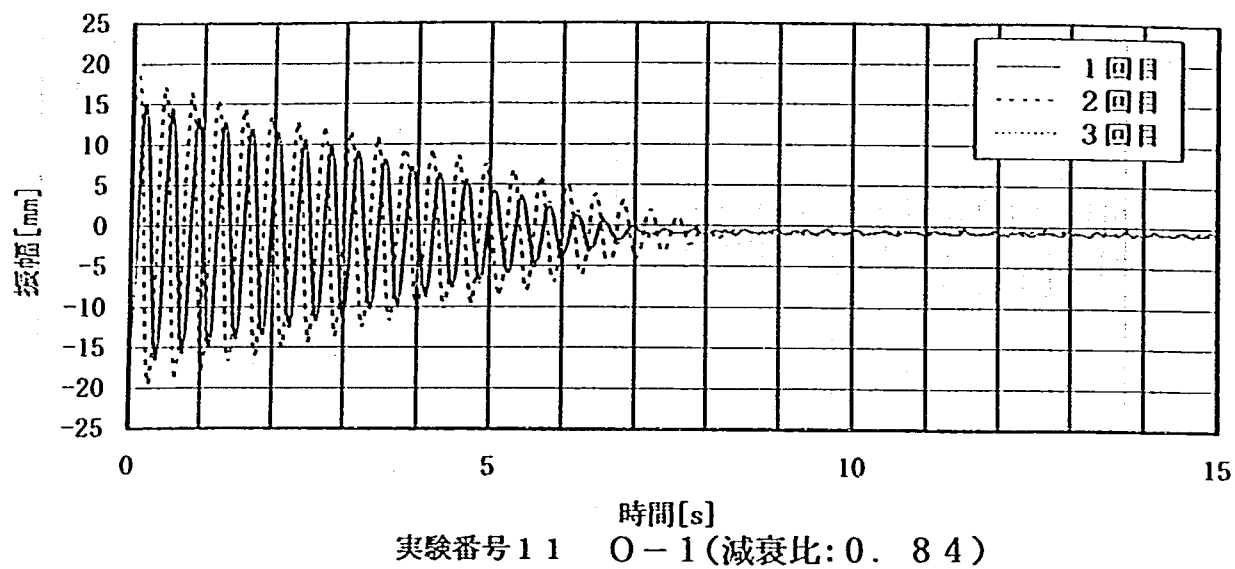


図-4.3.7.22 減衰波形

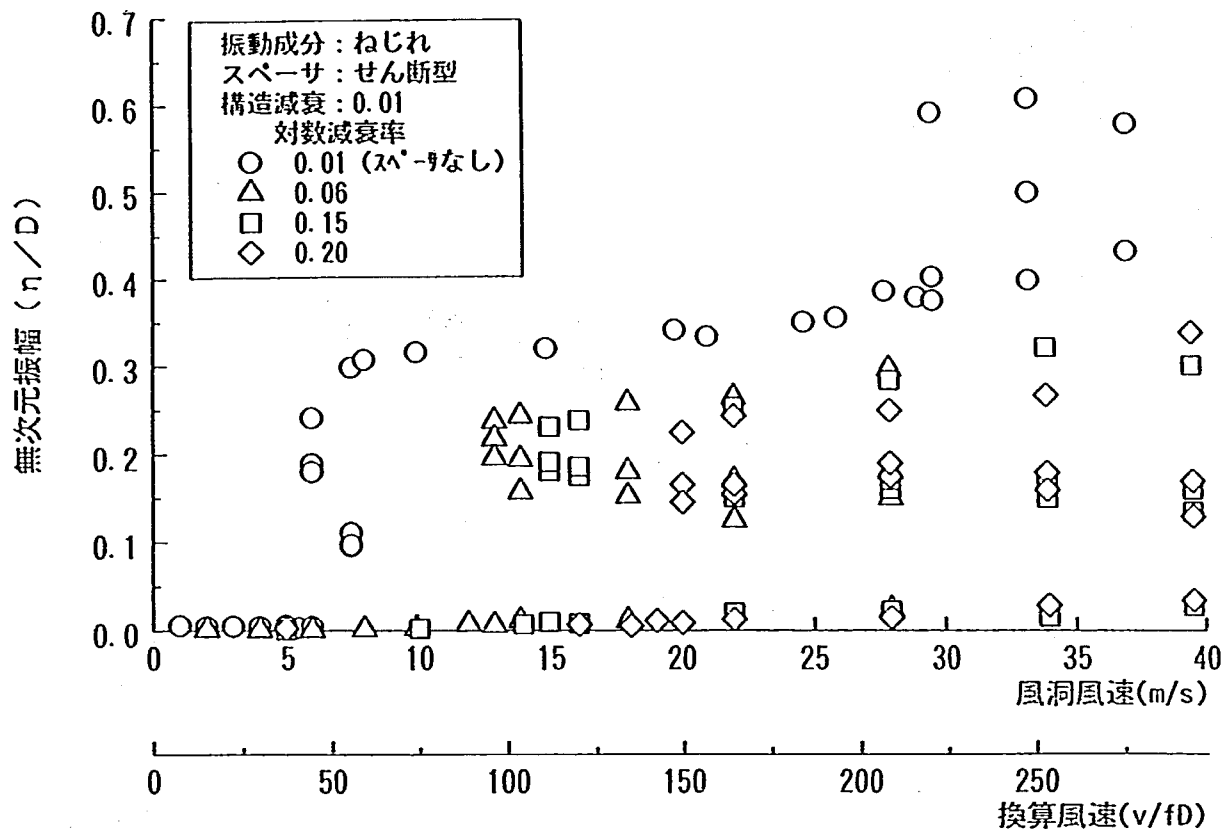


図-4.3.7.23 風速～振幅関係（スペーサの減衰性能）

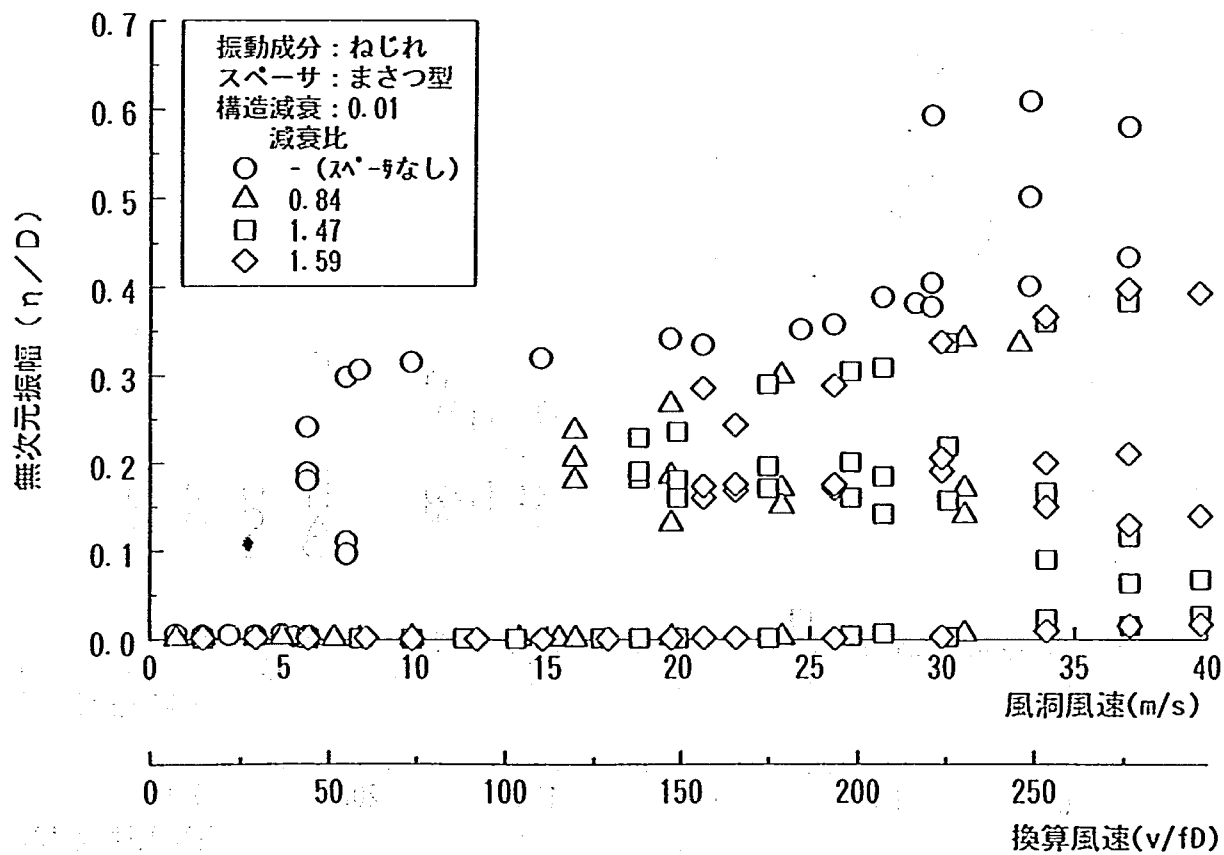


図-4.3.7.24 風速～振幅関係（スペーサの減衰性能）

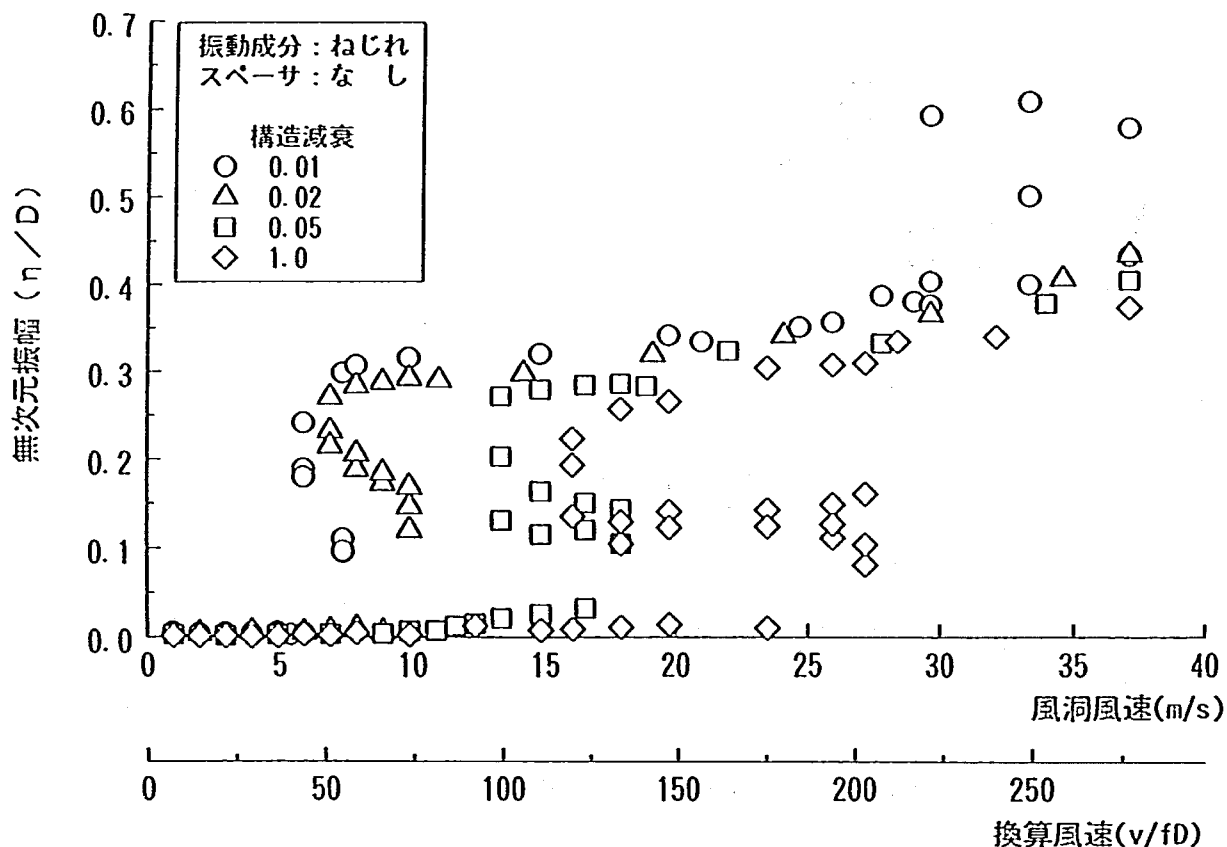


図-4.3.7.25 風速～振幅関係（構造減衰の影響）

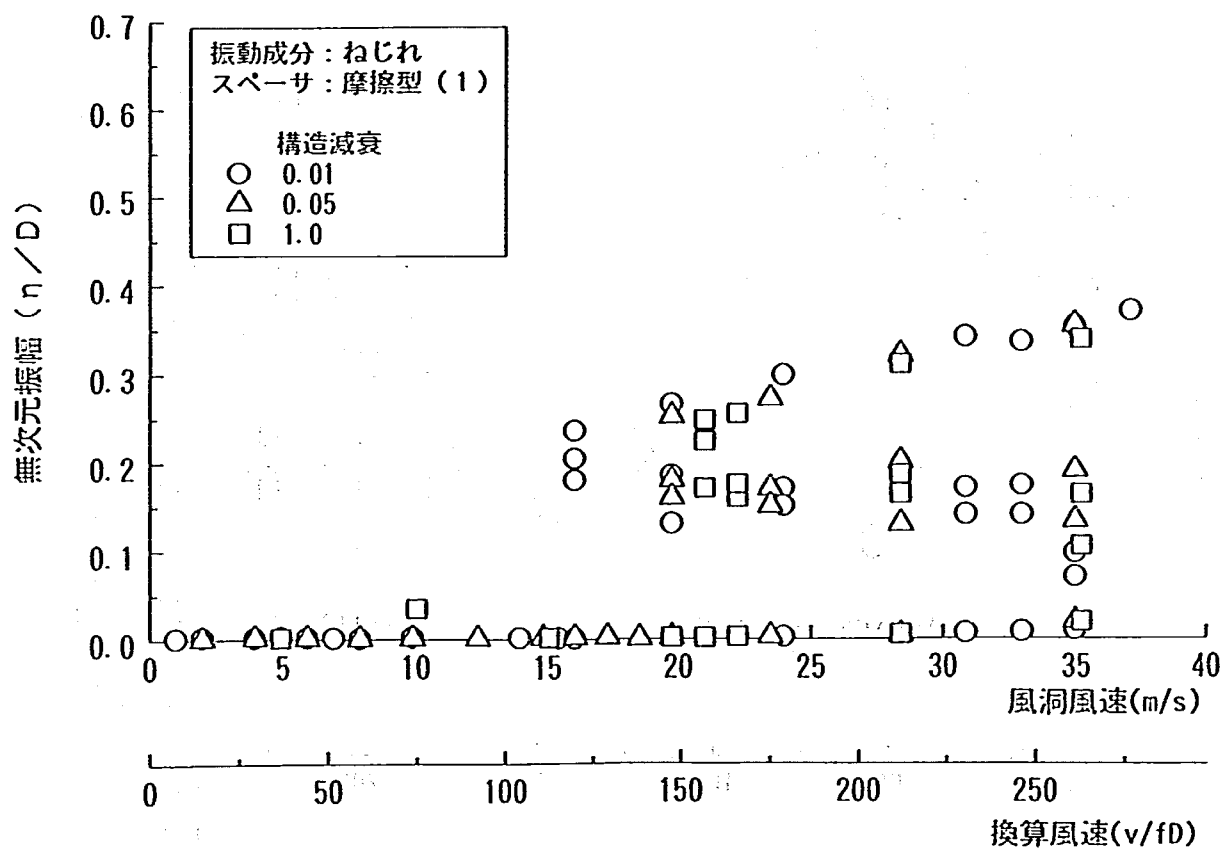


図-4.3.7.26 風速～振幅関係（構造減衰の影響）

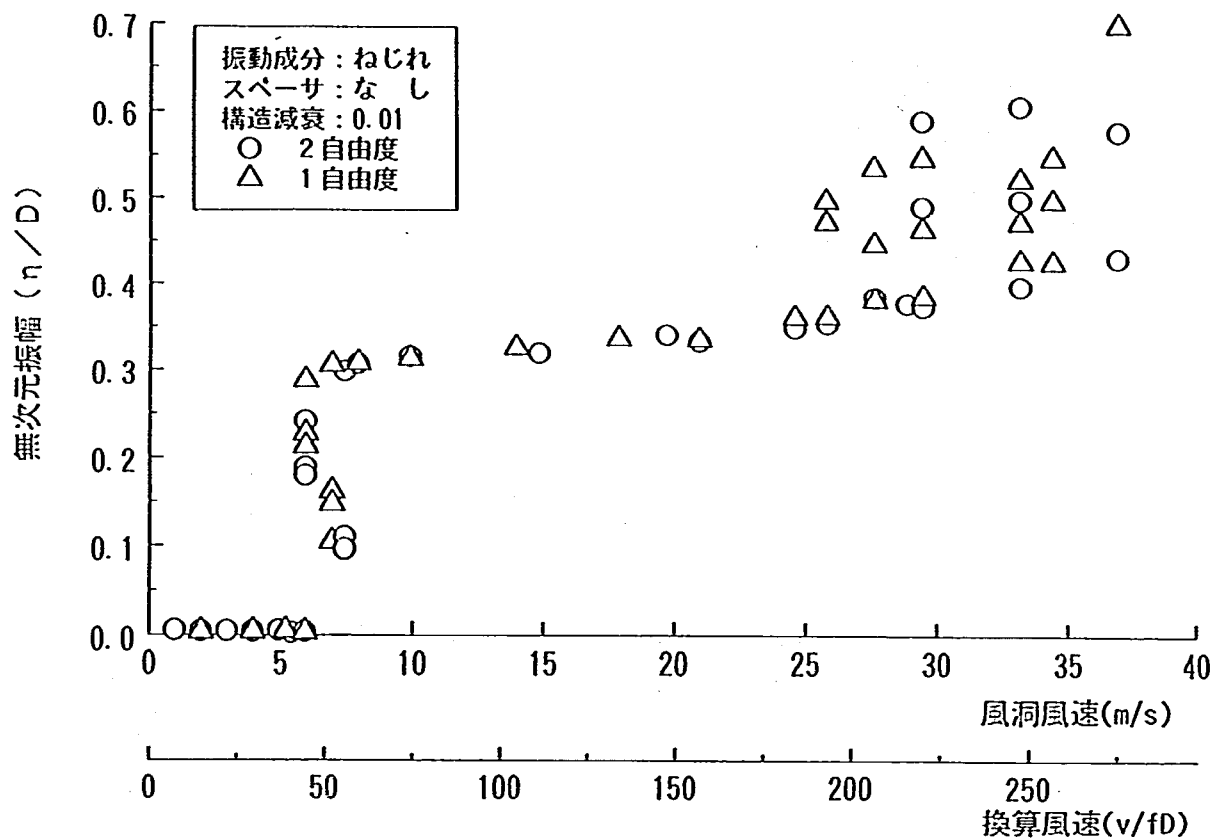


図-4.3.7.27 風速～振幅関係（自由度の影響）

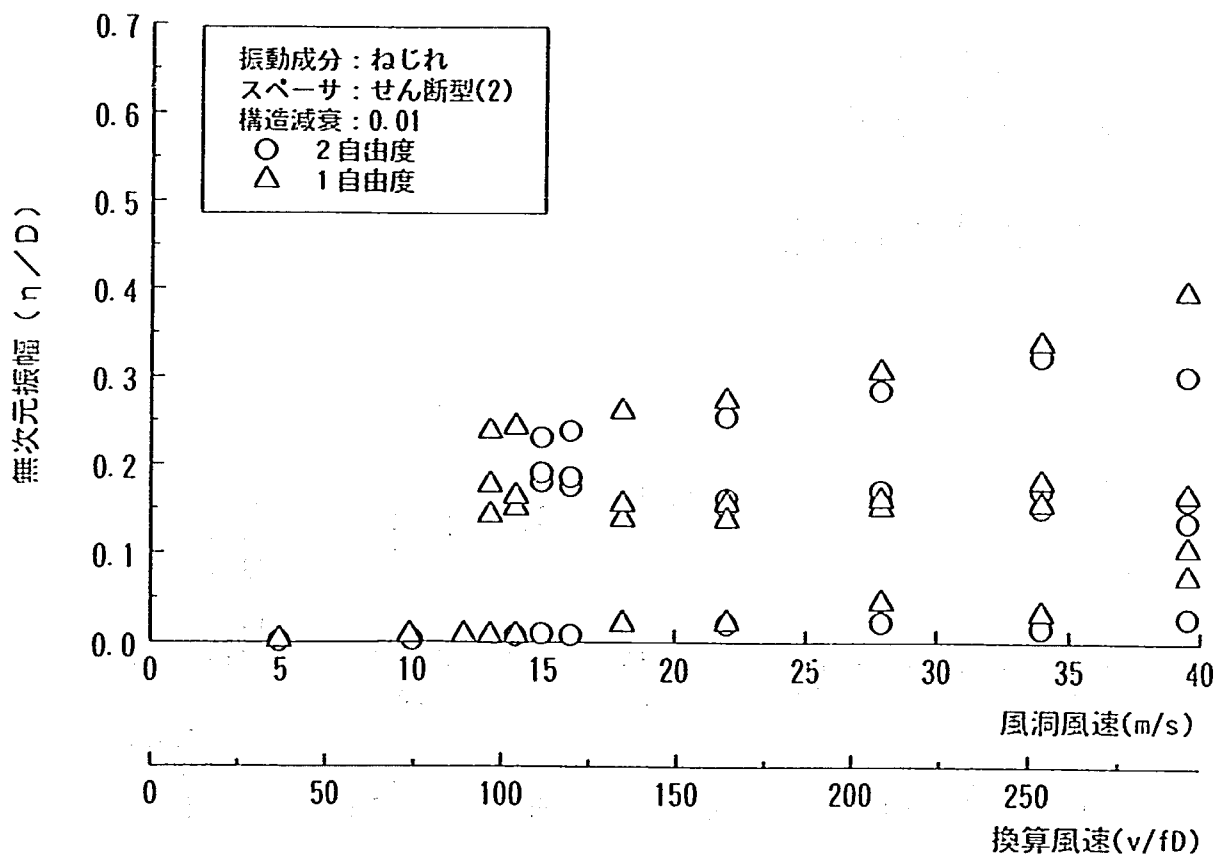


図-4.3.7.28 風速～振幅関係（自由度の影響）

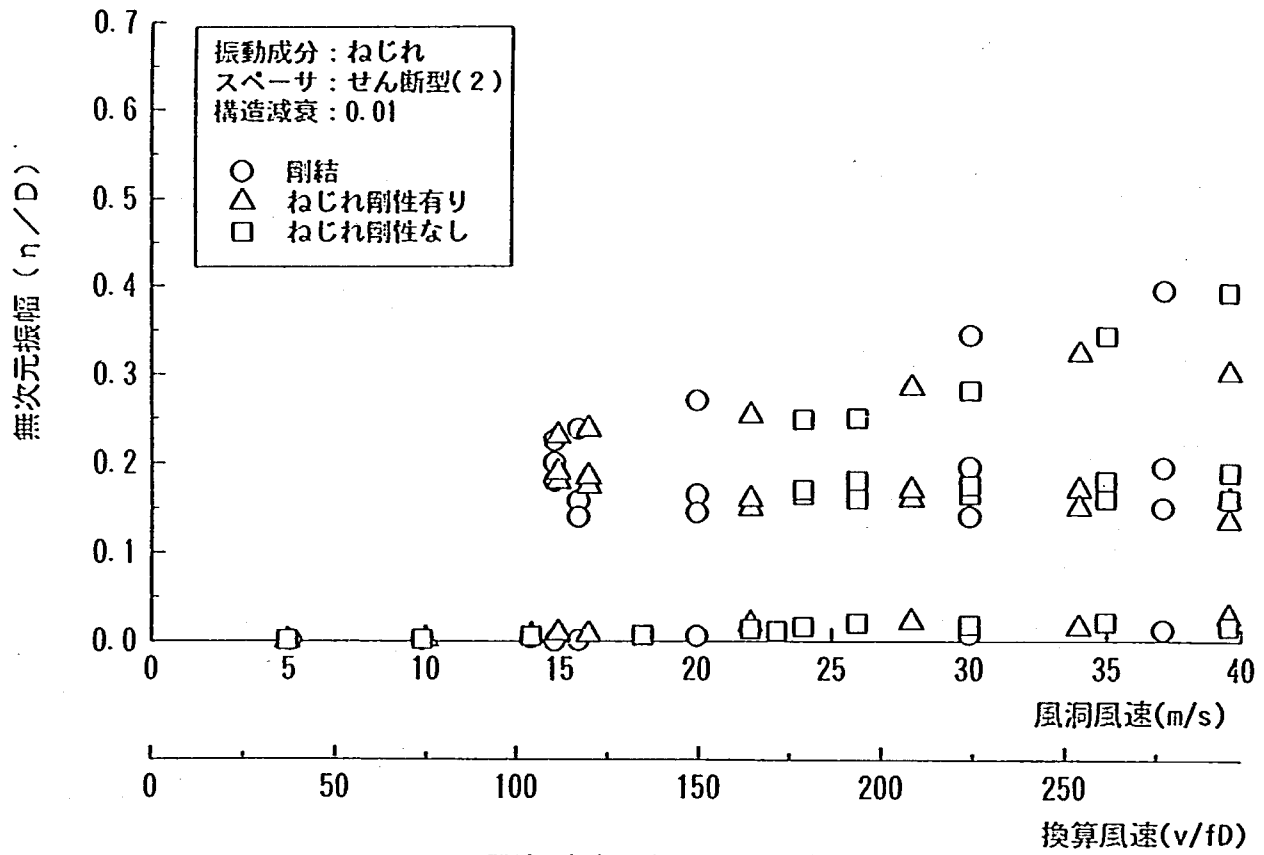


図-4.3.7.29 風速～振幅関係 ねじれ剛性の影響

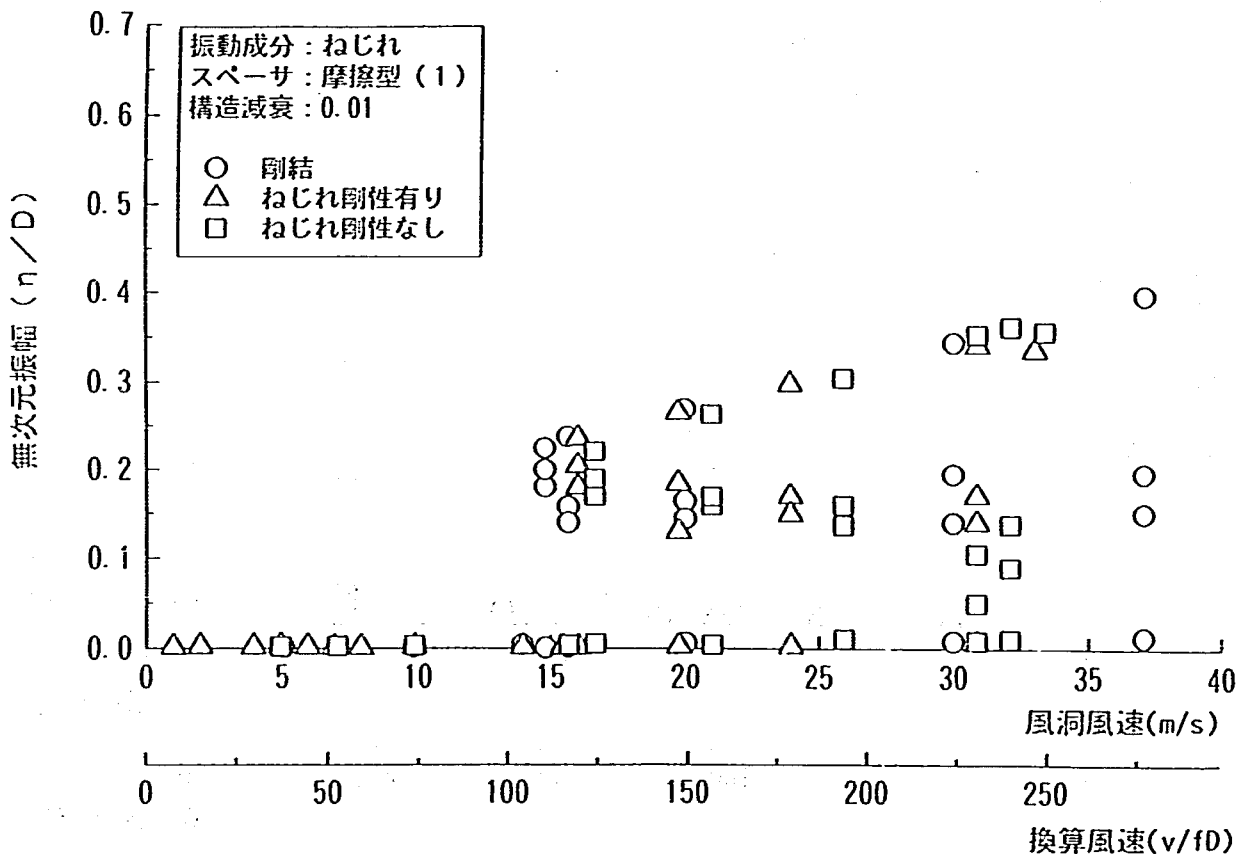


図-4.3.7.30 風速～振幅関係 (ねじれ剛性の影響)

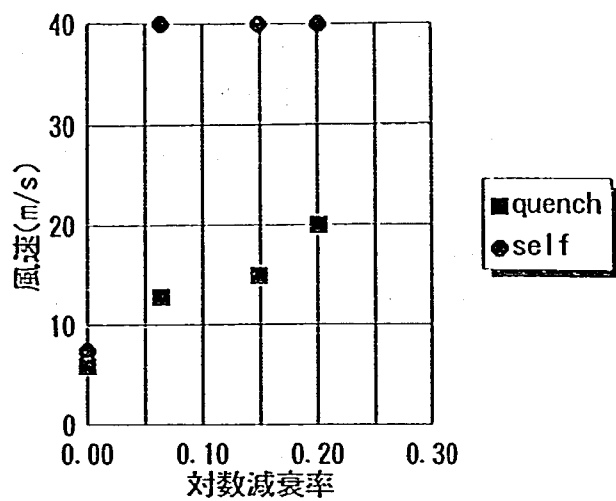


図-4.3.7.31 スペーサの減衰性能
(せん断型)

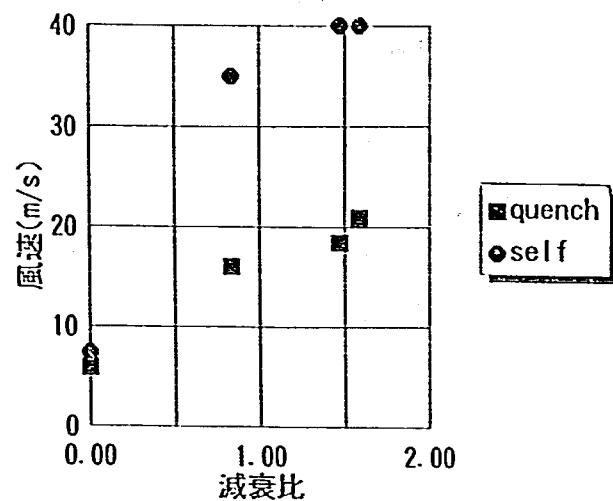


図-4.3.7.32 スペーサの減衰性能
(まさつ型)

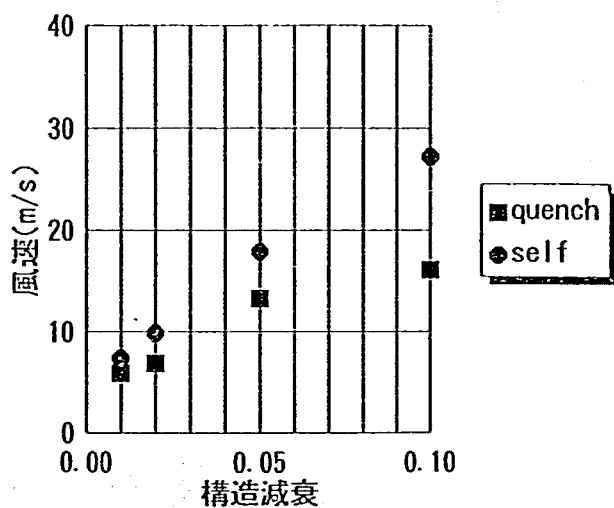


図-4.3.7.33 構造減衰の影響
(スペーサなし)

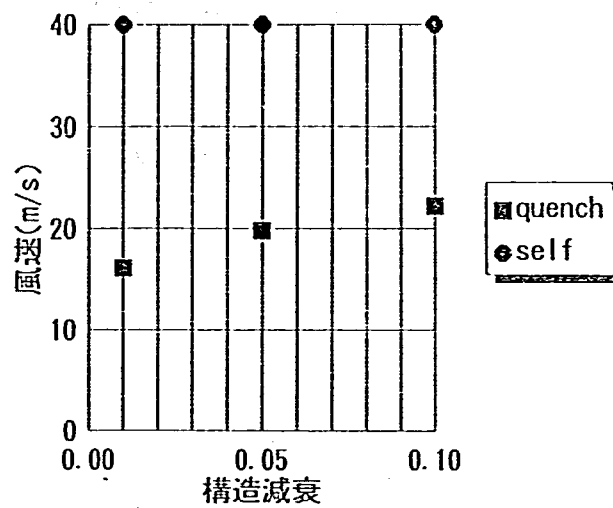


図-4.3.7.34 構造減衰の影響
(スペーサあり、摩擦型)

4.3.8 スペーサーの配置方法に関する解析的検討

本共同研究において、図-4.3.8.1および図-4.3.8.2に示す2つのタイプの減衰機能付きスペーサーが考案された。図-4.3.8.1は、ケーブルの鉛直および回転変位をスペーサー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ー（以下、せん断型スペーサーと呼ぶ）であり、図-4.3.8.2は、ケーブルの鉛直および回転変位をスペーサー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ー（以下、回転型スペーサーと呼ぶ）である。

ここでは、上記2タイプの減衰機能付きスペーサーの特性（減衰係数、バネ定数）、配置個数などが並列ケーブルの対数減衰率に与える影響を解析的に検討し、同型の減衰機能付きスペーサーの設計資料を作成する。

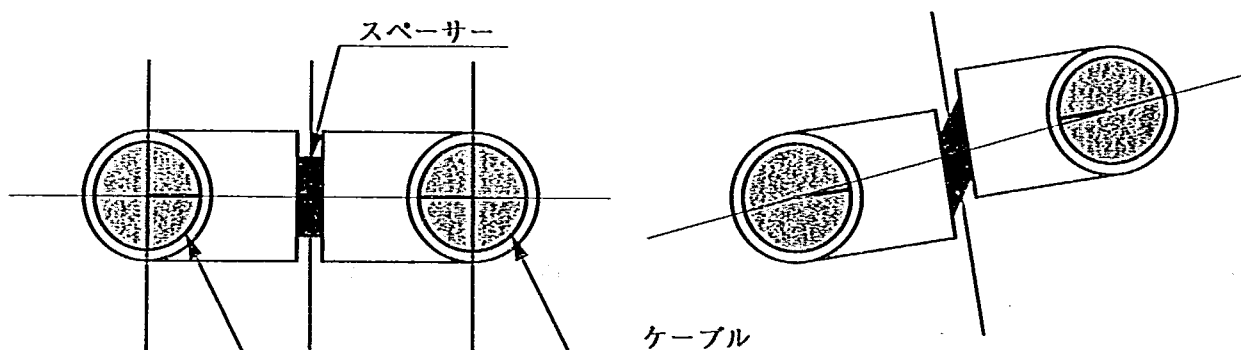


図-4.3.8.1 せん断型スペーサーの挙動

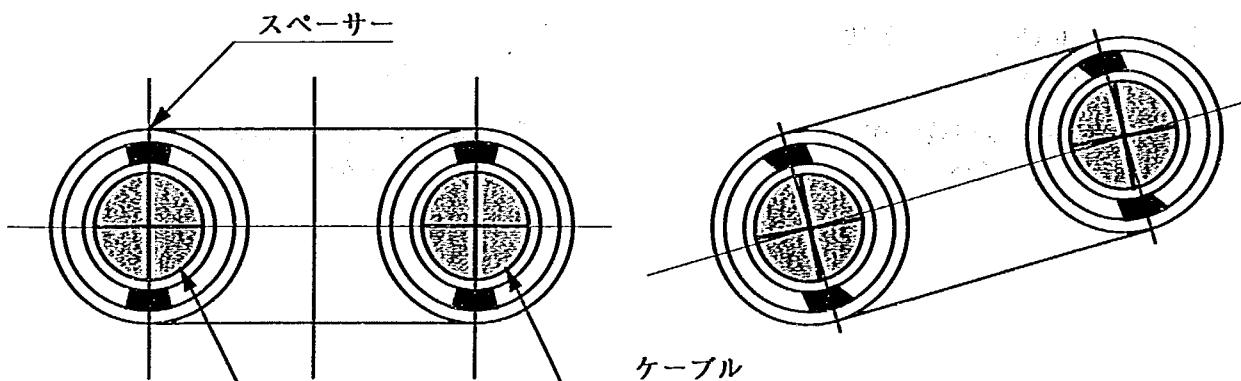


図-4.3.8.2 回転型スペーサーの挙動

(1) せん断型スペーサー

1) 3次元複素固有値解析

① 解析モデル

実大ケーブルによる振動実験で用いた表-4.3.8.1に示す並列ケーブルについて、スペーサーの特性(減衰係数、バネ定数)、ケーブルのねじり剛性および配置個数を変化させて3次元複素固有値解析を行い、ケーブルに付加される対数減衰率を計算した。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した。要素分割は24等分とした。スペーサーは、図-4.3.8.3に示すように、ダッシュポット、バネおよび剛体要素でモデル化した。

表-4.3.8.1 解析に用いた並列ケーブルの諸元

項目	値	備考
ケーブル長さ	$l = 98.46 \text{ m}$	
ケーブル外径	$D = 83.5 \text{ mm}$	
ケーブル間隔	$s = 250.5 \text{ mm}$	=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	$mlp = 1.041 \times 10^{-6} \text{ t} \cdot \text{m}^2/\text{m}$	推定値
ケーブル張力	$T = 165 \text{ tf}$	
ねじり剛性	$GJ = 0.511 \text{ tf} \cdot \text{m}^2$	実験値
鉛直方向振動数	$f = 1.500 \text{ Hz}$	$= 1/2l \cdot \sqrt{T/m}$
ねじり振動数	$f_{\theta} = 3.558 \text{ Hz}$	$= 1/2l \cdot \sqrt{GJ/mlp}$

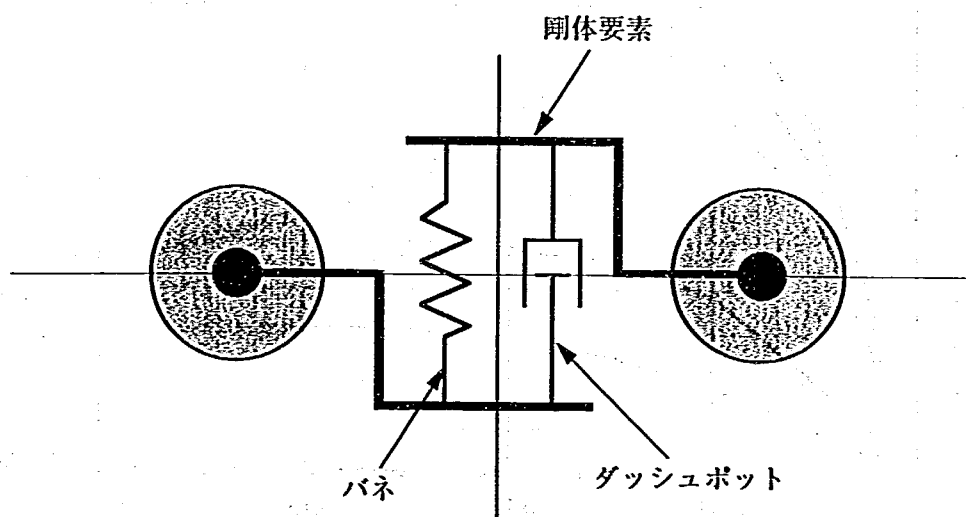


図-4.3.8.3 せん断型スペーサーのモデル化

② スペーサーの特性をパラメータとした解析

図-4.3.8.4のようにスペーサーをケーブルの1/2点に1個設置した場合について、スペーサーの減衰係数、バネ定数を表-4.3.8.2に示す範囲で変化させて、3次元複素固有値解析を行った。

表-4.3.8.2 減衰係数、バネ定数の範囲

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

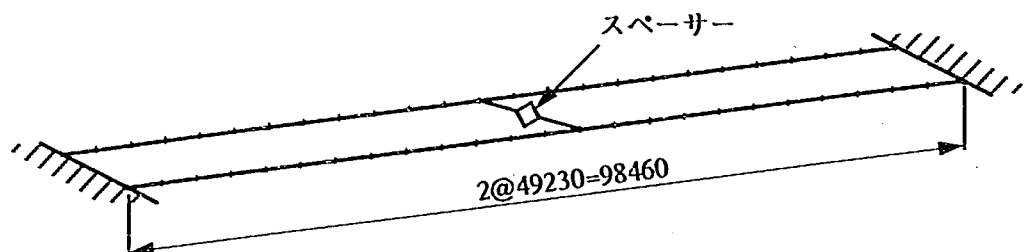


図-4.3.8.4 スペーサー 1 個の場合の解析モデル

得られたケーブルの対数減衰率とスペーサーの特性との関係を、図-4.3.8.5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。

この図から、

- a スペーサー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
 - b スペーサーの減衰係数には最適値があること
- がわかった。

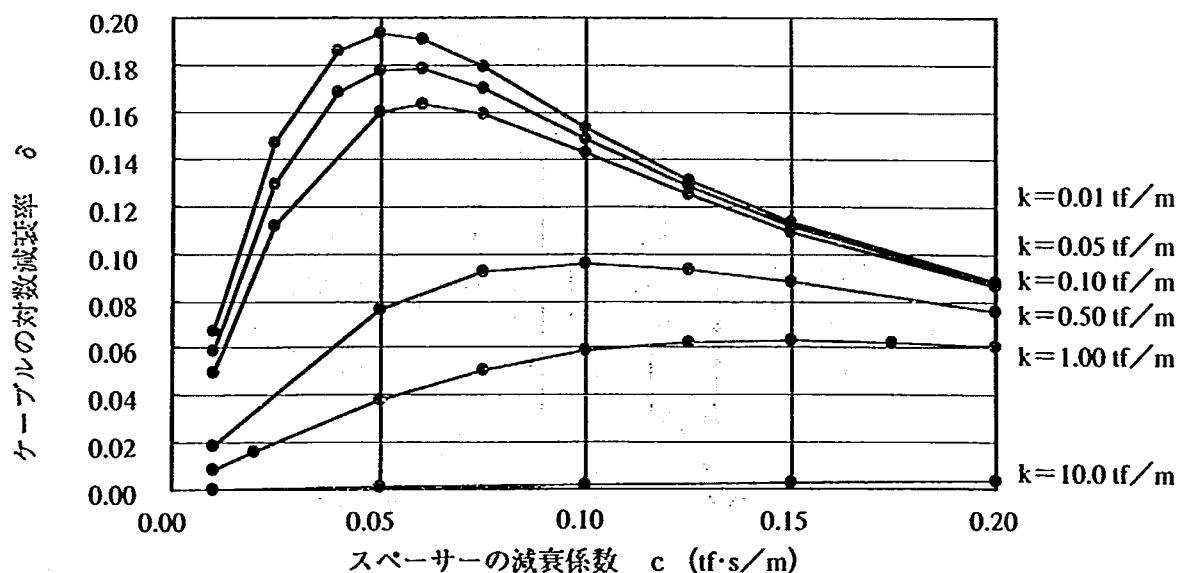


図-4.3.8.5 スペーサーの減衰係数 c とバネ定数 k の影響

③ ケーブルのねじり剛性をパラメータとした解析

スパーサーをケーブルの1/2点に1個設置し、スパーサーの減衰係数、バネ定数を固定して、ケーブルのねじり剛性のみを表-4.3.8.3のように変化させて、3次元複素固有値解析を行った。

表-4.3.8.3 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	=実験値×0.5
2	0.5110	=実験値×1.0
3	0.7665	=実験値×1.5
4	1.0220	=実験値×2.0

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、図-4.3.8.6に示す。

この図から、

- a 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
- b 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った。

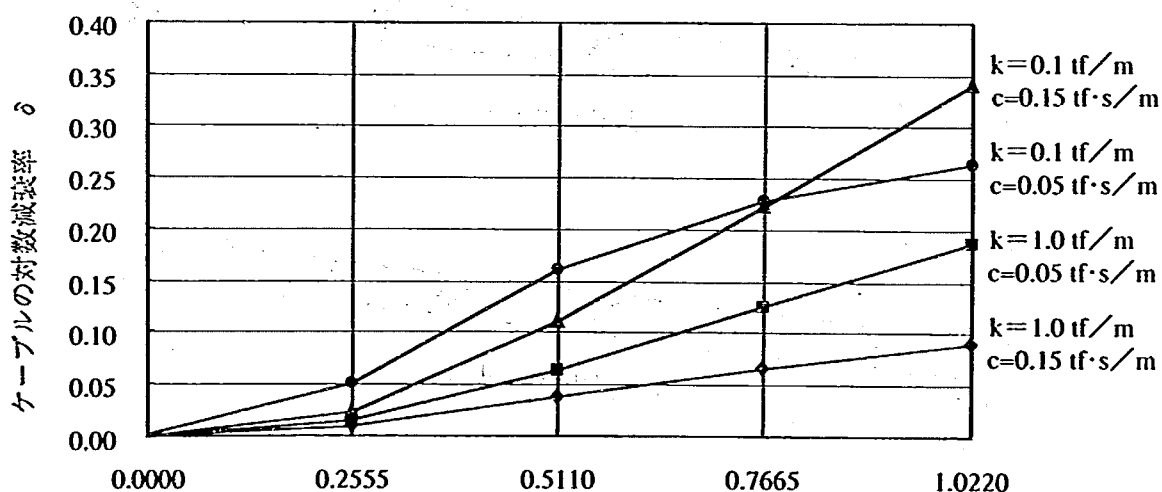


図-4.3.8.6 ケーブルのねじり剛性の影響

④ スパーサーの個数をパラメータとした解析

表-4.3.8.4に示すように、減衰係数、バネ定数を設置個数分したスパーサーを複数個設置した場合について3次元複素固有値解析を行い、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した。スパーサーは、図-4.3.8.7に示すように等分点に設置した。

表-4.3.8.4 スペーサー個数とスペーサーの特性

解析ケース	スペーサー個数	1	2	3	5	7
1	減衰係数 c (tf・s/m)	0.0500	0.0250	0.0167	0.0100	0.0071
	バネ定数 k (tf/m)	0.100	0.050	0.033	0.020	0.014
2	減衰係数 c (tf・s/m)	0.0750	0.0375	0.0250	0.0150	0.0107
	バネ定数 k (tf/m)	0.500	0.250	0.167	0.100	0.071
3	減衰係数 c (tf・s/m)	0.1000	0.0500	0.0333	0.0200	0.0143
	バネ定数 k (tf/m)	1.000	0.500	0.333	0.200	0.143

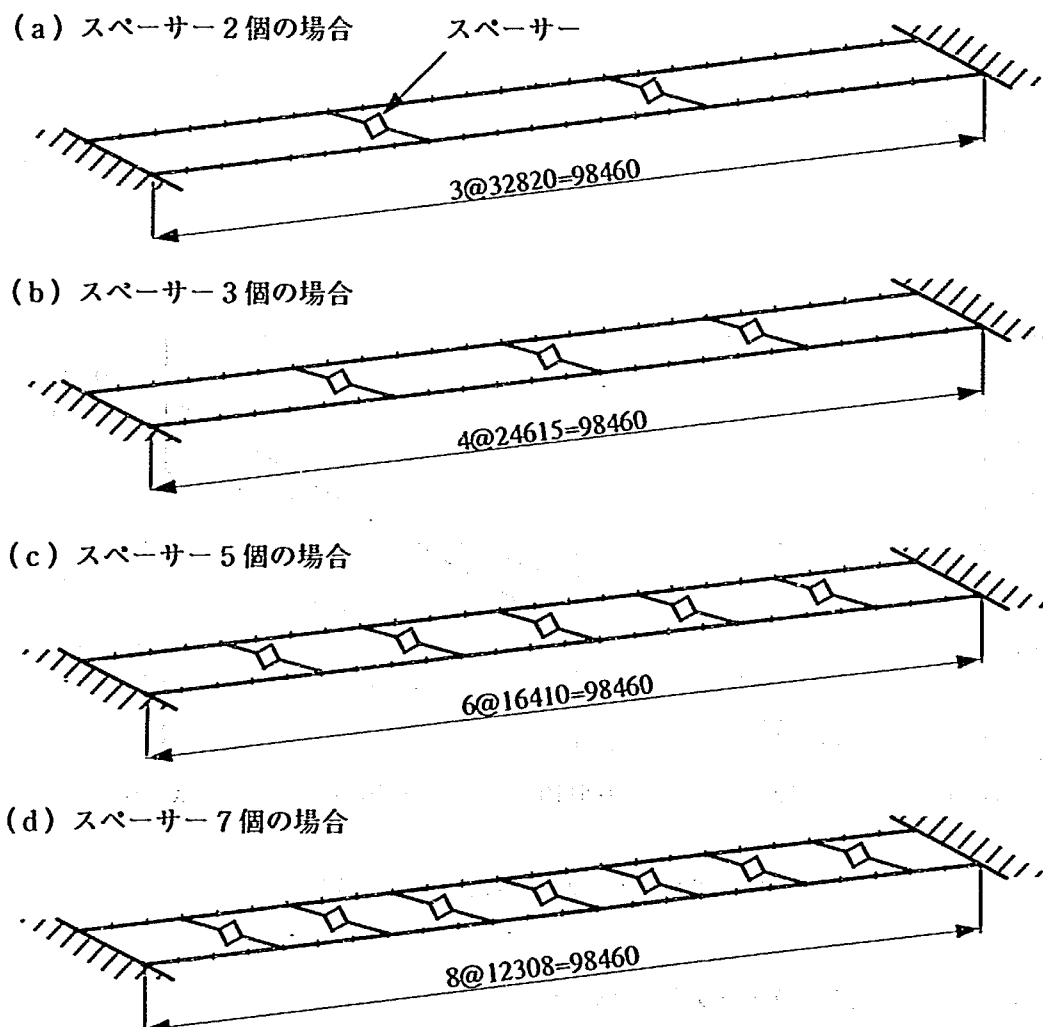


図-4.3.8.7 スペーサーを複数個設置した場合の解析モデル

得られたケーブルの対数減衰率とスペーサーの個数との関係を図-4.3.8.8に、ケーブルの振動数とスペーサーの個数との関係を図-4.3.8.9に示す。

これらの図から、スペーサーの減衰係数、バネ定数を設置個数分したスペーサーを複数個設置した場合

a ケーブルに付加される減衰はスペーサーの個数を増加させても、ほとんど変化しないこと

b ケーブルの固有振動数はスペーサーの個数を増加させても、ほとんど変化しないこと

がわかった。

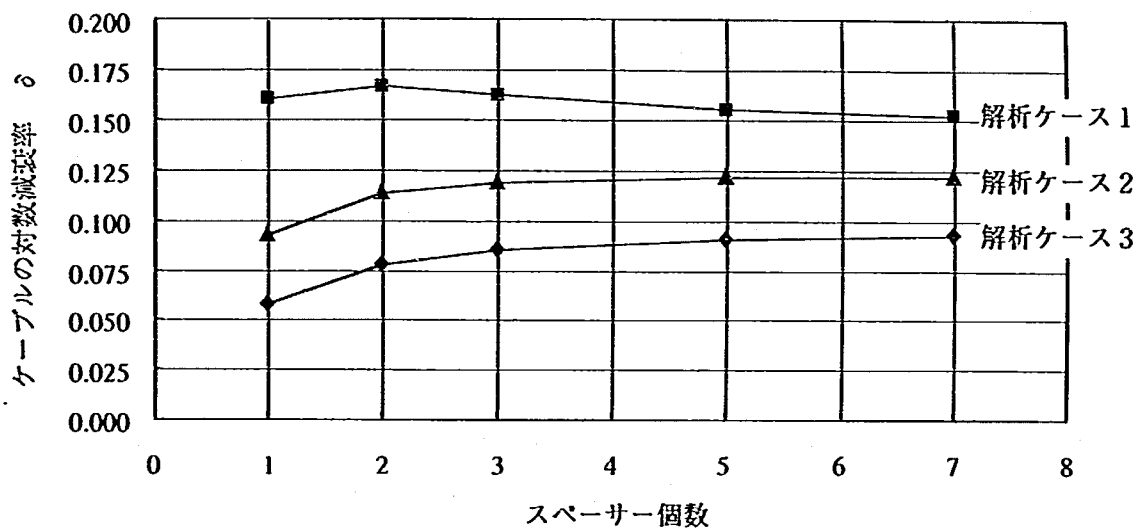


図-4.3.8.8 スペーサーの個数の影響

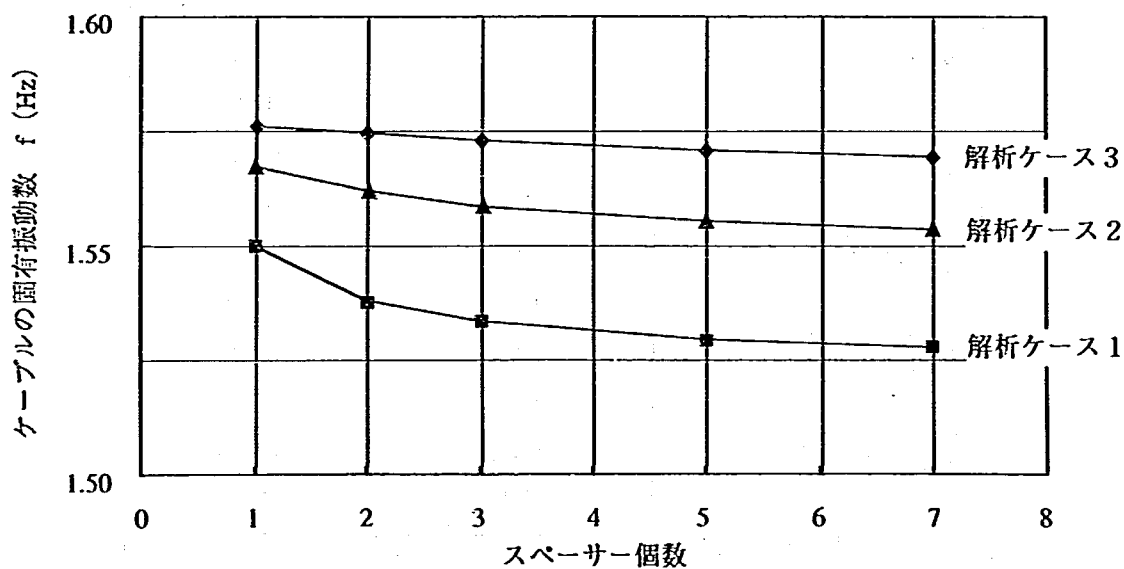


図-4.3.8.9 スペーサーの個数がケーブルの振動数に与える影響

2) 解析モデルの簡略化

前項では、代表的なケーブルについて、並列ケーブルおよびスパーサーを忠実にモデル化した3次元複素固有値解析により、ケーブルに付加される減衰を計算したが、実際の設計において3次元複素固有値解析から、最適なスパーサーの特性（減衰係数、バネ定数）を計算することは煩雑である。そこで3次元モデルを簡略化することを試みた。

① 解析モデル

図-4.3.8.10に示すように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った。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、質量慣性モーメントを集中させた。ケーブルの諸元は前項と同様、スパーサーの特性は減衰係数 $c=0.05tf \cdot s/m$ 、バネ定 $k=0.1tf/m$ 、個数は1個の場合で試算した。

② 解析結果

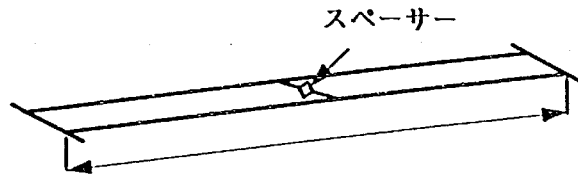
簡略化した各解析モデルを用いて計算されたケーブルの対数減衰率と前項の3次元複素固有値解析から得られたケーブルの対数減衰率を比較した結果を表-4.3.8.5に示す。これより、最も簡略化した解析モデル④であっても、十分な精度とは言えないが、ある程度ケーブルの対数減衰率を推定可能と考えられた。

表-4.3.8.5 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	1.550 (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)

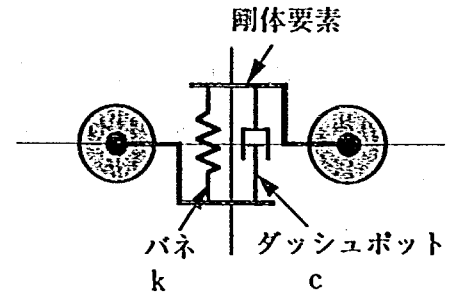
注) () 内の数値は3次元複素固有値解析の結果に対する比率である。

解析モデル①・・・並列ケーブル3次元モデル



【ケーブル諸元】

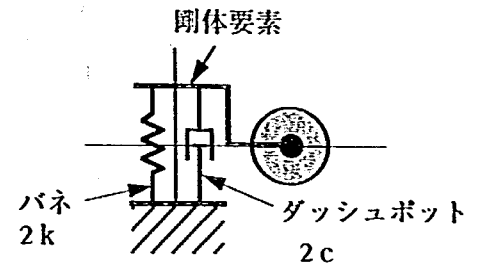
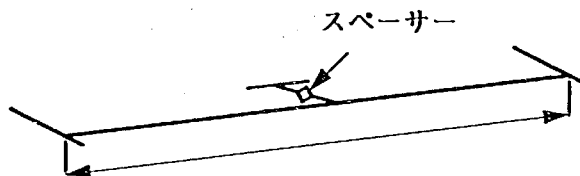
ケーブル長さ	$\ell = 98.46 \text{ m}$
ケーブル間隔	$s = 0.2505 \text{ m}$
ケーブル張力	$T = 165 \text{ tf}$
ケーブルねじり剛性	$GJ = 0.511 \text{ tf} \cdot \text{m}^2$
ケーブル質量	$M = 1/2 \cdot m \ell = 0.0931 \text{ t}$
ケーブル質量慣性モーメント	$MIp = 3/8 \cdot mIp \ell = 3.844 \times 10^{-5} \text{ t} \cdot \text{m}^2$



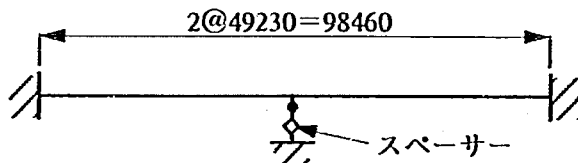
【スパーサー諸元】

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

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

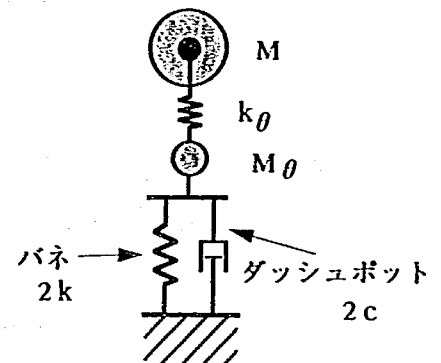


ケーブルのねじり剛性を考慮したバネ定数

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

ケーブルの質量慣性モーメントを考慮した質量

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



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

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

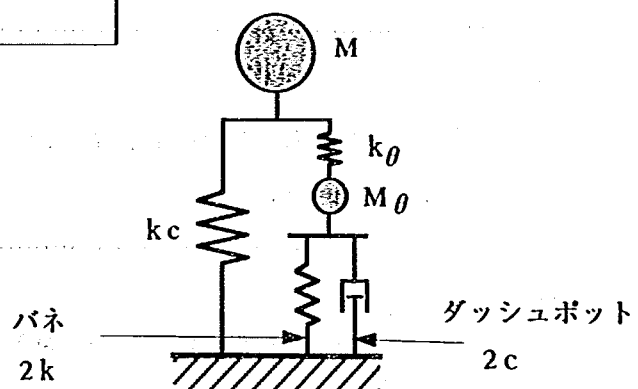


図-4.3.8.10 解析モデルの簡略化

3) 簡易式

前項において、解析モデル④（2質点モデル）で、ある程度ケーブルの対数減衰率を推定できると予想されたため、このモデルについて簡易式を導いた。

① 簡易式の誘導

図-4.3.8.11(a)の2質点モデルを図-4.3.8.11(b)の1質点モデルとする。

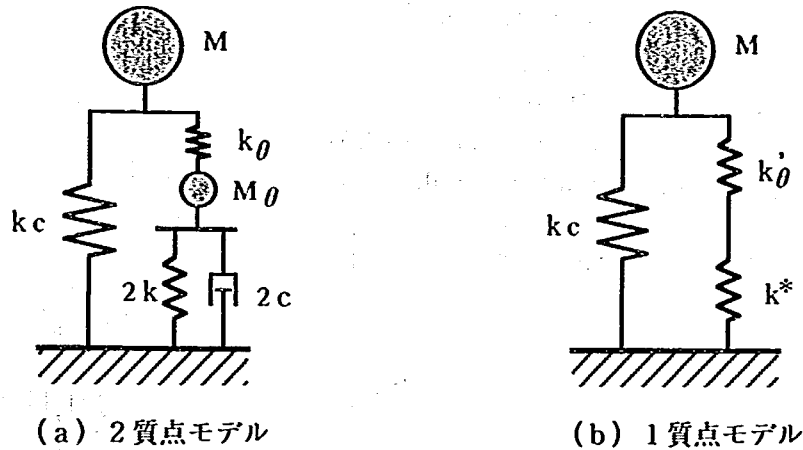


図-4.3.8.11 簡易モデル

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_θ' に取り込む。

$$k_\theta' = k_\theta - \omega^2 M_\theta \quad \dots\dots\dots (4.3.8.1)$$

ここに、

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

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

ω : 系の固有円振動数

スパーサー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。

$$k^* = 2k + i(2\omega c) \quad \dots\dots\dots (4.3.8.2)$$

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。

$$\omega = (k_\theta/M)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (4.3.8.3)$$

ここに、

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

M : ケーブルの質量 $=m \ell / 2$

$$k^* = k^* \cdot k_\theta' / (k^* + k_\theta') + k_c = a + ib \quad \dots\dots\dots (4.3.8.4)$$

ここに、

$$a = \frac{2k(k_\theta - \omega^2 M_\theta)(2k + k_\theta - \omega^2 M_\theta) + 4(\omega c)^2(k_\theta - \omega^2 M_\theta)}{(2k + k_\theta - \omega^2 M_\theta)^2 + 4(\omega c)^2} + k_c \quad \dots\dots\dots (4.3.8.5)$$

$$b = \frac{2\omega c(k_g - \omega^2 M_g)^2}{(2k + k_g - \omega^2 M_g)2 + 4(\omega c)^2} \dots\dots\dots (4.3.8.6)$$

また、複素固有値 p は次式となる。

$$p = (-\frac{k^*}{M})^{1/2} = (\frac{a}{M} + \frac{b}{M}i)^{1/2}i \dots\dots\dots (4.3.8.7)$$

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。

$$f = \frac{\text{Im}(p)}{2\pi} = \frac{r}{2\pi} \cos \frac{\theta}{2} \dots\dots\dots (4.3.8.8)$$

$$h = \frac{\text{Re}(p)}{\text{Im}(p)} = \tan \frac{\theta}{2} \dots\dots\dots (4.3.8.9)$$

ここに、

$$r = \frac{(a^2 + b^2)^{1/4}}{M} \dots\dots\dots (4.3.8.10)$$

$$\theta = \tan^{-1}(b/a) \dots\dots\dots (4.3.8.11)$$

また、対数減衰率は次式となる。

$$\delta = 2\pi h / (1 - h^2)^{1/2} \dots\dots\dots (4.3.8.12)$$

さらに、

$$\delta \approx 2\pi h = 2\pi \tan(\theta/2) \approx \pi b/a \dots\dots\dots (4.3.8.13)$$

とすると、簡易式は式 (4.3.8.14) の通りとなる。

【簡易式】（せん断型スペーサー）

$$\delta = \frac{2\pi(k_c/M)^{1/2}k_1^2c}{4(k_c+k_1)k^2+2(2k_c+k_1)k_1k+4k_c^2/M\cdot c^2+k_c\cdot k_1^2+4k_c\cdot k_1/M\cdot c^2} \quad (4.3.8.14)$$

ここに、

δ : ケーブルに付加される対数減衰率

$k_1 = k_s - k_c \cdot M_s/M$ (tf/m)

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

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

M : ケーブル質量 (t) $= 1/2 \cdot m\ell$

M_s : ケーブルの質量慣性モーメントを考慮した質量 (t) $= 3/2 \cdot mIp\ell$

ℓ : ケーブルの長さ (m)

s : ケーブルの間隔 (m)

m : ケーブルの単位長さ当りの質量 (t/m)

mIp : ケーブルの単位長さ当りの質量慣性モーメント (t・m²/m)

T : ケーブルの張力 (tf)

GJ : ケーブルのねじり剛性 (tf・m²)

k, c : スペーサーのバネ定数 (tf/m) , 減衰係数 (tf・s/m)

② 簡易式の精度

1)の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図-4.3.8.12に示す。簡易式のほうがやや大きめの値を与えるが、十分な精度でケーブルの対数減衰率が推定できることがわかった。

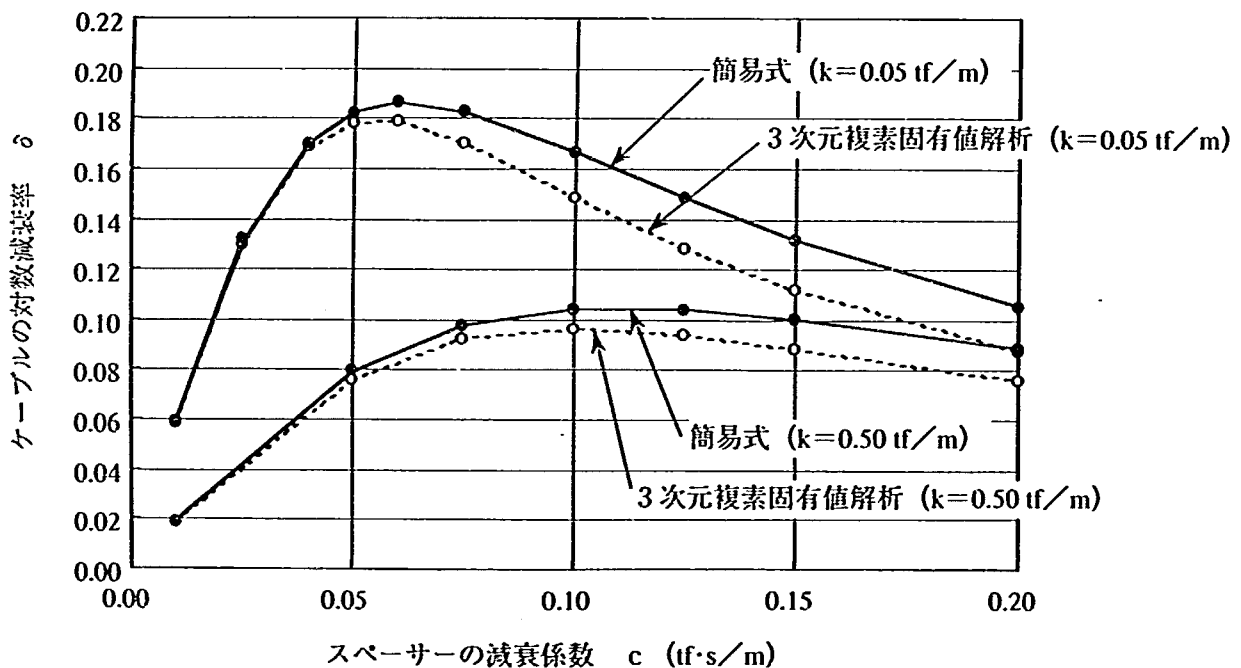


図-4.3.8.12 3次元複素固有値解析と簡易式の比較

(2) 回転型スペーサー

1) 3次元複素固有値解析

回転型スペーサーは、次式によりスペーサーの減衰係数およびバネ定数を変換すれば、せん断型のスペーサーと同様の解析モデルを用いることが可能と考えられた。このことを確認するために、図-4.3.8.13のように回転型スペーサーを忠実にモデル化した3次元複素固有値解析結果と(1)で得られたせん断型スペーサーの3次元複素固有値解析結果を比較した。

$$c_r = c_s / 2s^2 \quad \dots\dots\dots (4.3.8.15)$$

$$k_r = k_s / 2s^2 \quad \dots\dots\dots (4.3.8.16)$$

ここに、

c_s : せん断型スペーサーの減衰係数 (tf・s/m)

c_r : 回転型スペーサーの減衰係数 (tf・m・s/rad)

k_s : せん断型スペーサーのバネ定数 (tf/m)

k_r : 回転型スペーサーのバネ定数 (tf・m/rad)

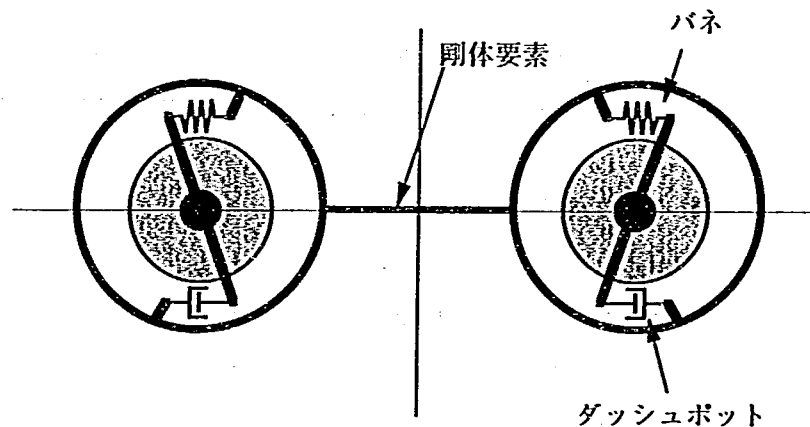


図-4.3.8.13 回転型スペーサーのモデル化

図-4.3.8.14のように、両解析から得られたケーブルの対数減衰率は一致しており、式 (4.3.8.15)、式 (4.3.8.16) により減衰係数およびバネ定数を変換すれば、せん断型スペーサーに置き換え可能ことが確認できた。

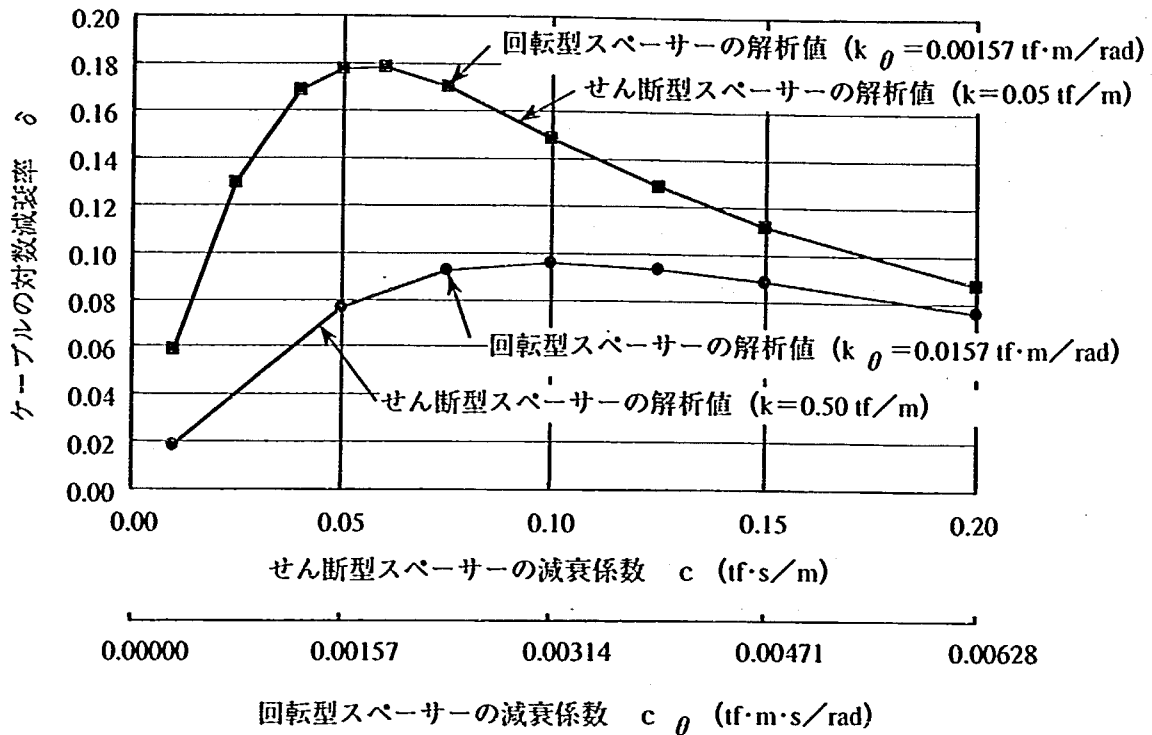


図-4.3.8.14 回転型スペーサーとせん断型スペーサーの比較

2) 簡易式

回転型スペーサーの簡易式は、式 (4.3.8.14) ～式 (4.3.8.16) により、式 (4.3.8.17) となる。

$$\delta = \frac{4\pi s^2 (k_c/M)^{1/2} k_t^2 c}{4(k_c + k_t) \cdot k^2 + 4s^2(2k_c + k_t)k_t \cdot k + 4k_c^2/M \cdot c^2 + 4s^4 \cdot k_c \cdot k_t^2 + 4k_c \cdot k_t/M \cdot c^2} \quad (4.3.8.17)$$

ここに、

δ : ケーブルに付加される対数減衰率

$k_t = k_\theta - k_c \cdot M_\theta / M$ (tf/m)

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

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

M : ケーブル質量 (t) $= 1/2 \cdot m \ell$

M_θ : ケーブルの質量慣性モーメントを考慮した質量 (t) $= 3/2 \cdot m I_p \ell$

ℓ : ケーブルの長さ (m)

s : ケーブルの間隔 (m)

m : ケーブルの単位長さ当りの質量 (t/m)

$m I_p$: ケーブルの単位長さ当りの質量慣性モーメント (t·m²/m)

T : ケーブルの張力 (tf)

GJ : ケーブルのねじり剛性 (tf·m²)

k, c : スペーサーのバネ定数 (tf·m/rad) , 減衰係数 (tf·m·s/rad)

4.4 新しい構造力学的制振装置の開発に関する研究（その2）

(1) 研究の概要

本研究は、斜張橋並列ケーブルにおけるウェイクギャロッピングの制振対策として、スペーサを活用して新しい構造力学的制振装置を開発することを目的としている。

まず研究の第1段階として、並列ケーブルをスペーサによって連結する方法について検討した。スペーサの個数、配置および結合条件等を変化させたケースについて振動解析を行い、それぞれの振動特性の調査を行った。その結果スペーサとケーブルとの結合においてケーブル軸まわりの回転を拘束することにより、並列ケーブルねじれ振動（面外逆位相モード）の振動数が高められることが分かった。この現象はケーブルとスペーサ結合部において発生するケーブル軸回りのせん断力に起因するものであるとの見解を得た。そこで、ケーブルとスペーサ取付部の間に高減衰ゴムを挟む工夫をすれば、ねじれ振動に伴い高減衰ゴムがせん断変形し減衰力が発生すると考えられる。これにより構造減衰が増加、さらには、ねじれ空力振動の安定化が図れるのではないかと考えた。至った。

この減衰付加効果を検討するため研究の第2段階として、平成6年度にはケーブルとスペーサの結合部に減衰を与えたモデルについて複素固有値解析を行った。その結果ねじれ振動（面外逆位相モード）に対する減衰付加効果が認められることが分かった。また、解析計算の妥当性を検討するために実験値と計算値との比較を行ったところ、相互間で結果の対応がとれていることが確認された。

(2) 振動解析

スペーサとケーブルの結合部に減衰装置（高減衰ゴム）を付設した場合の付加減衰効果を構造減衰（対数減衰率）に着目して解析的に調査した。

1) 振動解析条件

① 減衰の考え方

ケーブルとスペーサ取付部の間に高減衰ゴムを挟んだ構造を考えた場合、ねじれ振動（面外逆位相モード）時にケーブルとスペーサの固定部に生じるケーブル軸回りのせん断力がゴムに作用することになる。ケーブルのねじれ振動に伴いゴムがせん断変形した場合に生じる減衰力をケーブルの制振力に利用するのがねらいである。ここでねじれ振動により生じるケーブル軸回りの回転に着目する。ケーブルとスペーサ間に生じるケーブル軸回りのトルクとせん断力の関係を基に、高減衰ゴムのせん断減衰をケーブル軸回りの回転減衰に置き換えて考えることにする。図-4.4.1において、角速度を $V\theta$ 、せん断減衰部の接線方向の線速度を V_s 、回転中心からせん断減衰部までの距離を l とする。 $V\theta$ が微小である場合

$$V_s = l \cdot V\theta$$

せん断減衰係数を C_s 、角速度 $V\theta$ によるせん断減衰力を F とすると

$$F = C_s \cdot V_s = C_s \cdot l \cdot V\theta$$

F による回転中心回りの回転モーメントを M とすると

$$M = F \cdot l = C_s \cdot l^2 \cdot V \theta$$

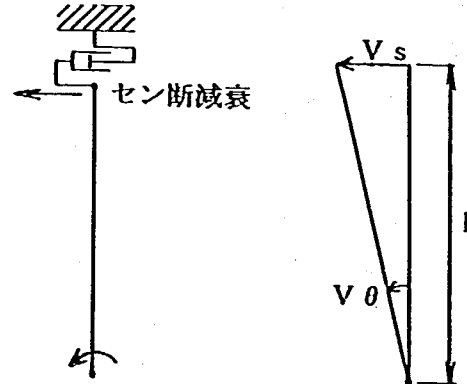
回転中心回りの回転減衰を考え、この減衰係数を $C \theta$ とすると

$$C \theta = M / V \theta = C_s \cdot l^2 \cdot V \theta / V \theta = C_s \cdot l^2$$

同様の考え方でゴムのせん断バネ定数 (K_s) を回転バネ定数 ($K \theta$) に置き換えると

$$K \theta = K_s \cdot l^2$$

となる。



② 解析モデル

図-4.4.1 回転減衰のモデル

解析モデルはスぺーサ中央 1 ヶ所配置とし、ケーブルとスぺーサの結合部にケーブル軸回りの回転に有効な回転減衰および回転バネ要素を配している。また、今回の解析においてはケーブルの曲げ剛性とねじれ剛性を考慮したモデルを使用するものとする。曲げ剛性については充実断面の15%程度（参考文献）との報告例があるためこれに従うものとし、ねじれ剛性についてもとりあえず充実断面の15%を用いて計算する。振動解析モデルを図-4.4.2に、振動解析条件を表-4.4.1、表-4.4.2にそれぞれ示す。

2) 振動解析結果

① スぺーサの回転減衰係数の影響

スぺーサ部の回転減衰係数を変化させた場合の、ねじれ振動（面外逆位相モード）に対する構造減衰（対数減衰率）の関係を調査した。解析モデルのスぺーサはケーブル中央 1 ヶ所設置とし、ねじれ振動の最低次振動モードに着目した。スぺーサとケーブルとの結合条件としてケーブル軸回りの回転を開放し、これに対応する回転方向に有効な減衰要素を設定した。結合部 1 ヶ所あたりの回転減衰係数 $C \theta$ を $0.003 \sim 3000 \text{Kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad.}$ の間で変化させて振動解析を行った結果を図-4.4.3、表-4.4.3に示す。図中、 $C \theta = 0.003 \sim 30 \text{Kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad.}$ の間では、 $C \theta$ の増加に対して対数減衰率 δ がほぼ正比例で増加することが分かる。これに対し $C \theta = 300, 3000 \text{Kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad.}$ のケースについては $C \theta$ の増加に対する δ の増加が頭打ちになり、さらには δ の値が減少することが分かる。 $C \theta$ と δ が比例関係にある領域におけるケーブルのねじれ振動数（最低次モード）はおよそ $0.60 \sim 0.61 \text{Hz}$ であり、それ以上の $C \theta$ に対しては約 1.0Hz となっている。

② ケーブルのねじれ剛性の影響

ケーブルのねじれ剛性の値によって上記スぺーサによる減衰付加効果が受ける影響を調査した。①と同様解析モデルのスぺーサはケーブル中央 1 ヶ所設置とし、ねじれ振動（面外逆位相モード）の最低次振動モードに着目した。スぺーサとケーブルとの結合条件についても①と同様であるが、ゴムのせん断バネ効果を考慮して新たに回転バネ要素を追加したモデルを用いた。結合部 1 ヶ所あたりの回転バネ定

数 $K\theta$ は $3.0\text{Kgf}\cdot\text{m}/\text{rad}$ の 1 種類とした。ケーブルのねじれ剛性が充実断面の 7, 15, 30% の 3 ケースに対して、それぞれ結合部 1 ヶ所あたりの回転減衰係数 $C\theta$ を $0.03\sim 3000\text{Kgf}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$ の間で変化させて振動解析を行った。その結果を図-4.4.4, 表-4.4.4 に示す。いずれのケースも①と同様の傾向を示し、 $C\theta$ と δ が正比例する領域での減衰効果はケーブルのねじれ剛性にかかわらず等しいことが分かる。 $C\theta = 300, 3000\text{Kgf}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$ のケースについてはケーブル剛性が高いものほど減衰効果が高く、振動数も高くなる傾向を示しており、ケーブルのねじれ剛性の影響が現れている。

3) 解析結果の評価

スパーサとケーブルの結合部に減衰装置を付設した場合の制振効果について得られた知見を以下に列記する。

① スパーサの回転減衰係数

ある一定の領域内ではスパーサ結合部の減衰係数 $C\theta$ に比例して対数減衰率 δ が変化するが、この領域を越えて $C\theta$ の値を増加させた場合 δ の増加は頭打ちとなる。比例領域における振動数がスパーサを設置しない場合の値とほぼ等しいのに対し、更に高い $C\theta$ の領域における振動数はこれまでに検討してきたスパーサ結合条件が 6 自由度固定のケースとほぼ等しいことより、この領域においてはスパーサの減衰力が過大となり拘束効果が大きくなり、高減衰ゴムに十分なセン断変形が生じなくなったため減衰能力が低下したと判断できる。

② ケーブルのねじれ剛性

ケーブルのねじれ剛性が大きいほどねじれ振動時（面外逆位相モード）にケーブルとスパーサ間に生じるトルクが大きくなる。このため高減衰ゴムに生じるセン断変形量が増加し減衰効果が増大すると考えられる。しかし解析結果を見ると、ケーブルのねじれ剛性を充実断面の 7%~30% と変化させた場合この効果が現れるのはスパーサがケーブル軸回りの回転を拘束する影響が大きいと考えられる（ $C\theta$ の増加に対する δ の増加が頭打ちとなる）領域のみであり、高減衰ゴムが十分に変形し得る状態（ $C\theta$ と δ の比例領域）ではこの影響はほとんど見られない。

(3) 実験値との比較

解析結果の妥当性を確認するため、実物大ケーブルを用いた振動実験の結果との比較を行った。このケーブル振動実験要領に関しては 4.3.2.3.3 に詳細が示されている。

1) 振動解析条件

ケーブル振動実験に対応させた振動解析モデルとして、図-4.4.2 に示したモデルのケーブル長およびケーブル間隔をそれぞれ 98.46m , 0.2505m に変更したものを用いた。振動解析条件を表-4.4.5, 表-4.4.6 に示す。スパーサ結合部の回転バネ定数 $K\theta$ は $10\text{Kgf}\cdot\text{m}/\text{rad}$ の 1 種類とし、回転減衰係数を変化させた条件で解析を行った。高減衰ゴムのセン断弾性係数 Gd はセン断ひずみ γ の関数で与えられるが、ここでは簡単のため Gd が一定値をとるものと仮定し $Gd = 3.623\text{kgf}/\text{cm}^2$ の値を用いるものとする。高減衰ゴムのセン断バネ定数を K_s として回転バネ定数 $K\theta$ を以下の手順で算出した。

$$\begin{aligned} K_s &= (Gd \cdot A) / H r \\ &= 30.3 \quad \text{Kgf}/\text{cm} \end{aligned} \quad (4.3.5, (1) \text{節の } 1) \text{ における等価剛性 } K\theta \text{ に対応})$$

$$K \theta = K_s \cdot l^3$$

$$= 30.3 \times 5.675^3$$

$$= 975.8 \cdots \rightarrow 1000 \text{ Kgf} \cdot \text{cm} / \text{rad.} = 10 \text{ Kgf} \cdot \text{m} / \text{rad.}$$

ここで、 $A = 25 \text{ cm}^2$: 高減衰ゴムの有効断面積

$Hr = 3.0 \text{ cm}$: 高減衰ゴム厚

$l = 5.675 \text{ cm}$: ケーブル断面中心から高減衰ゴムまでの距離

(4.3.5, (1)節の1) に対応)

2) 解析結果

スペーサ結合部1ヶ所あたりの回転減衰係数 $C \theta$ を $0.003 \sim 30 \text{ Kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad.}$ の間で変化させて振動解析を行った結果を図-4.4.5, 表-4.4.7に示す。

実験で用いた高減衰ゴムのセン断減衰係数 $C_s = 2.425 \text{ Kgf} \cdot \text{s} / \text{cm}$ (4.3.5, (2)節の2) における円周方向運動の減衰係数 $C \theta$ に対応) から回転減衰係数を算出すると

$$C \theta = 2.425 \times 5.675^2 = 78.1 \cdots \rightarrow 80 \text{ Kgf} \cdot \text{cm} / \text{rad.} = 0.8 \text{ Kgf} \cdot \text{m} / \text{rad.}$$

となる。実験で得られた対数減衰率が $\delta = 0.05 \sim 0.07$ (制振装置を設置しない状態での構造減衰率 $\delta = 0.01$ を差し引いた値) 程度であることから、この中間の値を図-4.4.5上にプロットして解析結果と比較すると、解析結果の方が若干大きい値をとるものの、オーダー的には近い値を示すことが分かる。このことより解析結果は妥当であると考えられる。

(4) まとめ

以上の検討により得られた知見を以下に示す

- ・スペーサとケーブル取付部の間の回転によりセン断変形を生じる部分に適切な減衰係数の高減衰ゴムを挟む構造によって、ねじれ振動に対して有効な減衰付加効果を与えることが可能である。
- ・今回検討したスペーサの配置はケーブル中央1ヶ所のケースであり、最低時のねじれ振動モードを対象にしている。高次の振動モードへの適用を考えた場合、剛結されたスペーサと同様にスペーサの配置個数を増やすことで対応可能であると考えられる。
- ・解析結果と実験結果の比較により、本解析の妥当性および減衰機能付きスペーサの有効性が確認された。

【参考文献】坂本・北条・江口・矢野； 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, No. 446 / 119

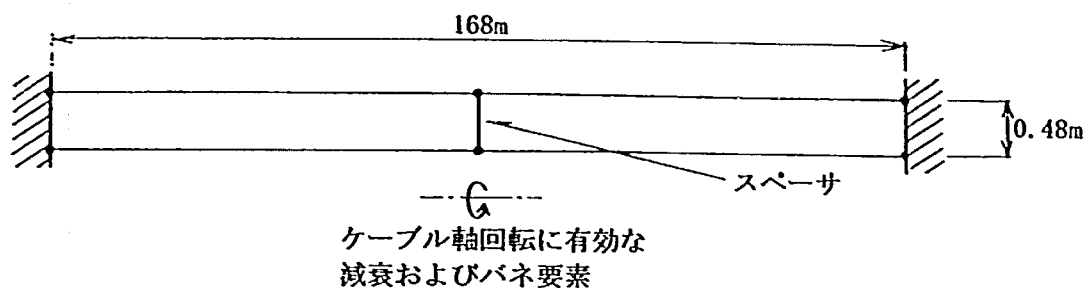


図-4.4.2 振動解析モデル (減衰効果検討用)

表-4.4.1 解析モデルの振動諸元 (ケーブル)

項 目	諸 元
ケーブル長	168 m
ケーブル間隔	0.48 m (3D)
ケーブル重量	69 Kgf/m
ケーブル張力	268 tf/ケーブル
ケーブル断面積	2.010E-02 m ²
断面 2 次モーメント	4.826E-06 m ⁴
ねじり定数	9.651E-06 m ⁴
ヤング率	2.10E+07 tf/m ²
ポアソン比	0.30

表-4.4.2 解析モデルの振動諸元 (スペーサ)

項 目	諸 元
スペーサ断面積	9.6E-04 m ²
断面 2 次モーメント	
強軸回り	2.048E-06 m ⁴
弱軸回り	2.880E-09 m ⁴
ねじり定数	1.125E-08 m ⁴
ヤング率	2.10E+07 tf/m ²
ポアソン比	0.30

表-4.4.5 解析モデルの振動諸元
(ケーブル：実験値比較用)

項 目	諸 元
ケーブル長	98.64 m
ケーブル間隔	0.2505 m (3D)
ケーブル重量	18.53 Kgf/m
ケーブル張力	169.1 tf/ケーブル
ケーブル断面積	1.876E-03 m ²
断面 2 次モーメント	1.594E-07 m ⁴
ねじり定数	3.187E-07 m ⁴
ヤング率	2.10E+07 tf/m ²
ポアソン比	0.30

表-4.4.6 解析モデルの振動諸元
(スペーサ)

項 目	諸 元
スペーサ断面積	9.6E-04 m ²
断面 2 次モーメント	
強軸回り	2.048E-06 m ⁴
弱軸回り	2.880E-09 m ⁴
ねじり定数	1.125E-08 m ⁴
ヤング率	2.10E+07 tf/m ²
ポアソン比	0.30

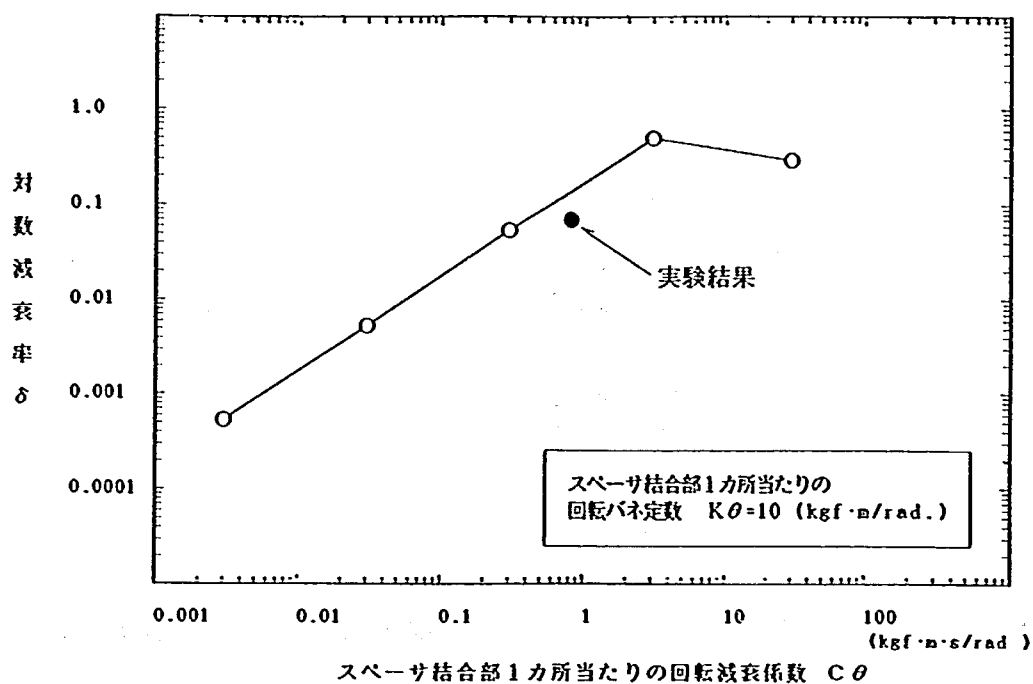


図-4.4.5 スぺーサの減衰係数と対数減衰率の関係（実験のパラメータによる解析）

表-4.4.7 スぺーサの減衰係数と対数減衰率の関係
（実験のパラメータによる解析）

$K\theta$ Kgf·m/rad.	$C\theta$ Kgf·m·s/rad.	f Hz	δ
10.0	0.000	1.575	0.00000
10.0	0.003	1.575	0.00053
10.0	0.030	1.575	0.00529
10.0	0.300	1.575	0.05282
10.0	3.000	1.610	0.49450
10.0	30.000	1.948	0.28988

$K\theta$: スぺーサ結合部1カ所あたりの回転バネ定数

$C\theta$: スぺーサ結合部1カ所あたりの回転減衰係数

f : 固有振動数

δ : 対数減衰率

並列ケーブルのねじれ振動

（面外逆位相の最低次モード）に着目

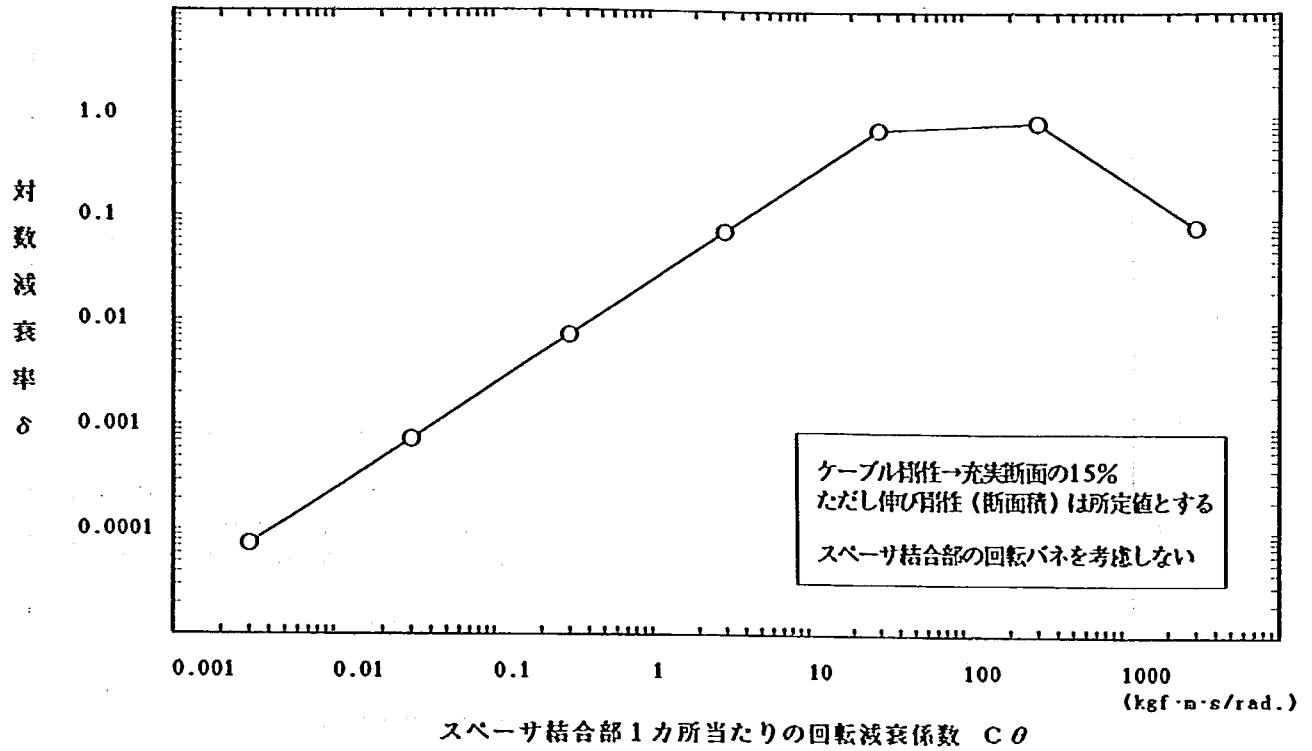


図-4.4.3 スペーサの減衰係数と対数減衰率の関係

表-4.4.3 スペーサの減衰係数と対数減衰率の関係

$K\theta$ Kgf·m/rad.	$C\theta$ kgf·m·s/rad.	f Hz	δ
考慮せず	0.000	0.6050	0.00000
	0.003	0.6050	0.00007
	0.030	0.6050	0.00073
	0.300	0.6050	0.00734
	3.000	0.6050	0.07338
	30.000	0.6096	0.73897
	300.000	0.9857	0.87817
	3000.000	1.0111	0.08491

$k\theta$: スペーサ結合部1カ所あたりの回転バネ定数

$c\theta$: スペーサ結合部1カ所あたりの回転減衰係数

f : 固有振動数

δ : 対数減衰率

並列ケーブルのねじれ振動(面外逆位相の最低次モード)に着目

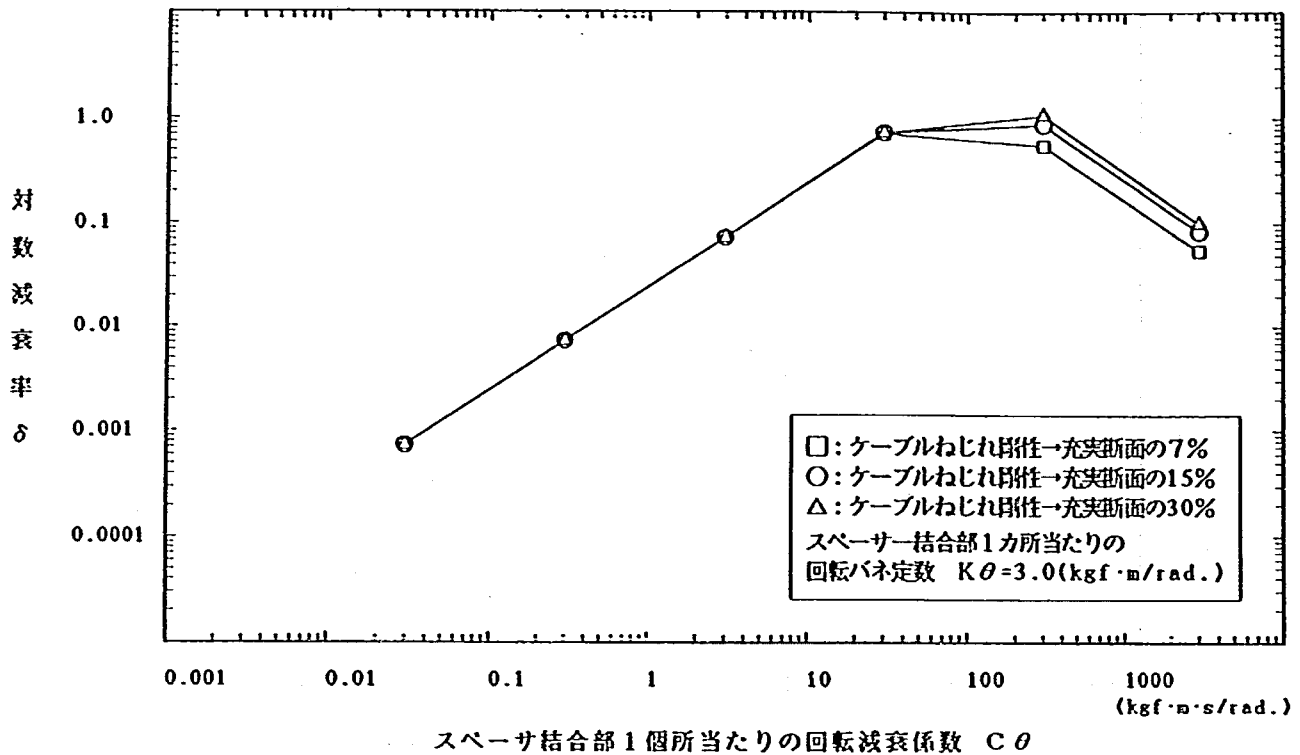


図-4.4.4 ケーブルのねじれ剛性と対数減衰率の関係

表-4.4.4 ケーブルのねじれ剛性と対数減衰率の関係

$K\theta$ kgf·m/rad.	$C\theta$ kgf·m·s/rad.	f (Hz)			δ		
		7%モデル	15%モデル	30%モデル	7%モデル	15%モデル	30%モデル
3.0	0.03	0.6058	0.6068	0.6083	0.00072	0.00073	0.00073
3.0	0.30	0.6058	0.6068	0.6083	0.00724	0.00727	0.00728
3.0	3.00	0.6059	0.6069	0.6083	0.07240	0.07269	0.07280
3.0	30.00	0.6160	0.6115	0.6105	0.71691	0.73186	0.73559
3.0	300.00	0.8744	0.9855	1.0769	0.55621	0.87801	1.08979
3.0	3000.000	0.8891	1.0111	1.1032	0.05563	0.08491	0.10116

7%モデル: ケーブルのねじれ剛性→充実断面の 7%

15%モデル: ケーブルのねじれ剛性→充実断面の15%

30%モデル: ケーブルのねじれ剛性→充実断面の30%

$k\theta$: スペーサ結合部1カ所あたりの回転バネ定数

$c\theta$: スペーサ結合部1カ所あたりの回転減衰係数

f : 固有振動数

δ : 対数減衰率

並列ケーブルのねじれ振動(面外逆位相の最低次モード)に着目

4.5 空力的制振手法の開発に関する研究

(1) 研究の目的

渦励振やレインバイブレーションに対して制振効果が認められるストライプ方式の空気力学的対策をウェークギャロッピングに適用し、その制振効果を確認することを目的とする。ストライプ方式の空気力学的対策とは、ケーブルの表面にU字型の溝をストライプ状につけ、表面粗度の効果によりみかけのレイノルズ数を増加させ、後流を縮退させることで制振しようとするものである。

(2) 研究の方法

1) 試験内容

ストライプ方式ケーブルの振動特性把握のため二次元ばね支持試験を実施した。本研究では「4.2.2 ケーブル間隔と迎角の影響（その2）」と同様に、上流側、下流側双方のケーブルについて主流直角方向に1自由度を与えて、その影響を調査した。

2) 風洞施設

試験は、住友重機械工業㈱総合技術研究所のエッフェル風洞を用いて実施した。風洞の測定部の寸法は高さ2m×幅1.5m×長さ15mで、風速範囲は0～20m/sである。表-4.5.1に主要諸元を、図-4.5.1に概観図を示す。

表-4.5.1 風洞装置主要諸元

項 目	エッフェル風洞
形 式	エッフェル型室内還流方式
軸 心 長	32.24m
測 定 部	1.5m(W)×2m(H)×20m(L)
風 速	0.5～20m/s
分 布 偏 差	±1%以下
乱 れ 度	1%以下
フ ァ ン 径	φ2000mm
最 大 回 転 数	1300rpm
電 動 機	55KW DCモータ（プーリーVベルト）
制 御 方 式	サイリストレオナード方式
計 測 装 置	バネ支持実験装置 静的空気力測定装置 電磁加振減衰装置 データ処理装置

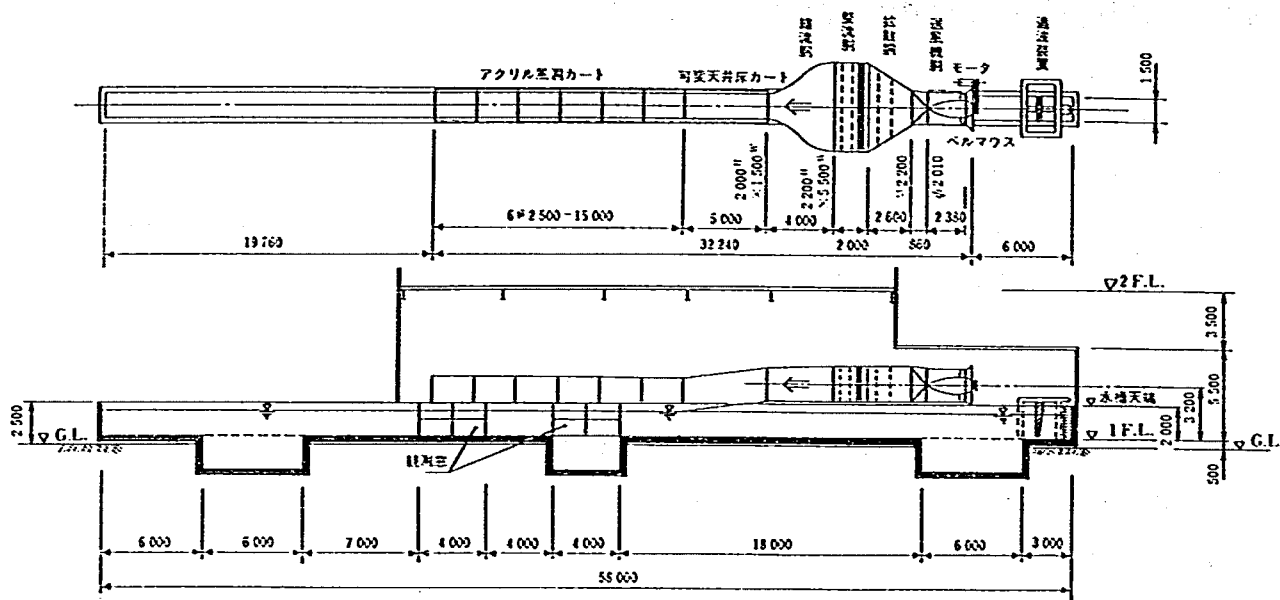


図-4.5.1 風洞装置概観図

3) 試験装置

図-4.5.2に示すようにケーブルを配置し、上流側、下流側ケーブルに主流直角方向に1自由度を与え、それらの応答を観測する。ケーブル配置は、前年度の結果⁹⁾を参考にして代表的なものを選定した。ケーブル模型はアクリル製パイプを使用し、端部には気流の二次元性を保つための端板を設置した。閉塞率は5%以下である。ケーブル模型の変位は光学式変位計を用いて計測し、大振幅の応答まで計測できるように、振幅の計測範囲をケーブル径の2倍程度とした。以下に、実験の諸元を示す。

① 基本実験条件（上流側、下流側ケーブル共通）

使用気流	一様流
ケーブル径	$D = 50, 100\text{mm}$
模型長さ	$L = 1080\text{mm}$
振動数	$f = 1.2, 0.6\text{Hz}$
風速範囲	$V = 0 \sim 20\text{m/s}$
無次元風速範囲	$V_r = 0 \sim 350$
レイノルズ数	$Re = 0 \sim 1.4 \times 10^5$
スクラートン数	$Sc = 29 \sim 31$

② 実験パラメータ

表-4.5.2に、試験対象ケースの実験パラメータを示す。

表-4.5.2 試験対象ケース

試験番号		1	2	3	4	5	6	7
ケーブルタイプ		ｽﾄﾗｲﾌﾞ	ｽﾄﾗｲﾌﾞ	ｽﾄﾗｲﾌﾞ	ｽﾄﾗｲﾌﾞ	ｽﾄﾗｲﾌﾞ	ｽﾄﾗｲﾌﾞ	ｽﾄﾗｲﾌﾞ
ケーブル径 D(mm)		50	50	50	50	50	50	100
ケーブル間隔	Sh/D	2	3	3.5	4	2	3	4
	Sv/D	0	0	0	0	1	1	0
迎角 α (°)		0	0	0	0	26.6	18.4	0
振動数 f (Hz)	上流側	1.15	1.15	1.14	1.15	1.15	1.14	0.57
	下流側	1.15	1.14	1.14	1.15	1.15	1.14	0.56
重量 W (kgf/m)	上流側	6.22	5.63	5.99	5.64	6.77	6.69	11.06
	下流側	5.55	5.03	5.45	5.27	5.40	5.21	11.08
対数減衰率 δ	上流側	0.00772	0.00834	0.00742	0.00834	0.00681	0.00686	0.01677
	下流側	0.00833	0.00942	0.00877	0.00856	0.00880	0.00913	0.01648
スルット数 Sc	上流側	31.3	30.7	29.0	30.7	30.1	30.0	30.3
	下流側	30.2	30.9	31.2	29.4	31.0	31.1	29.8

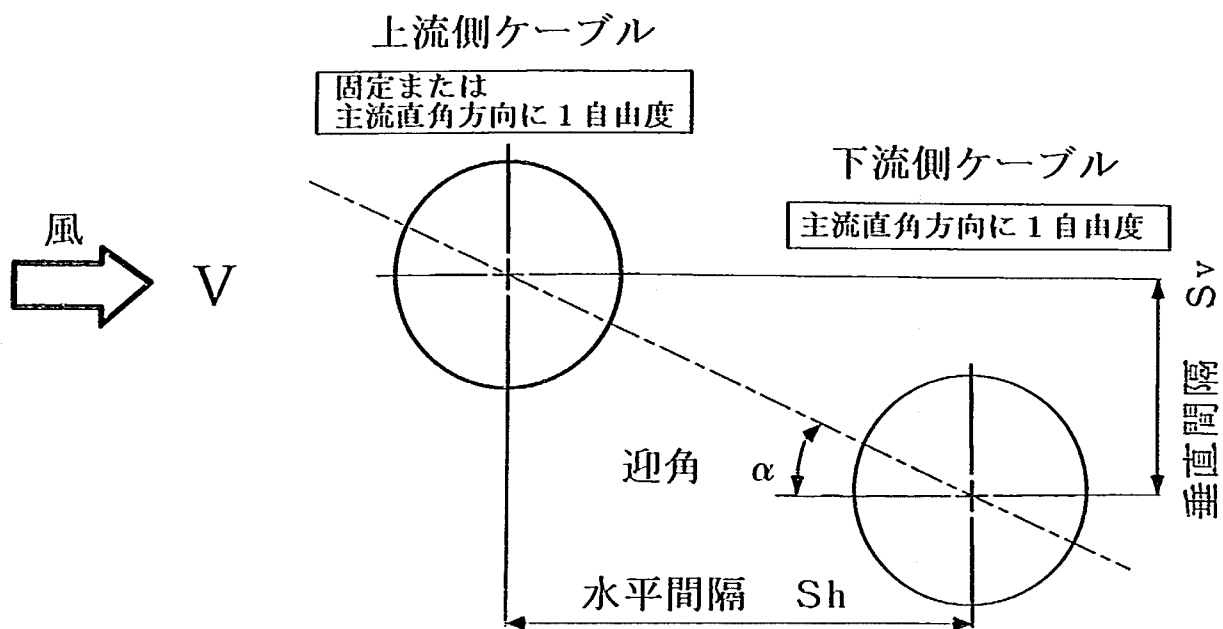
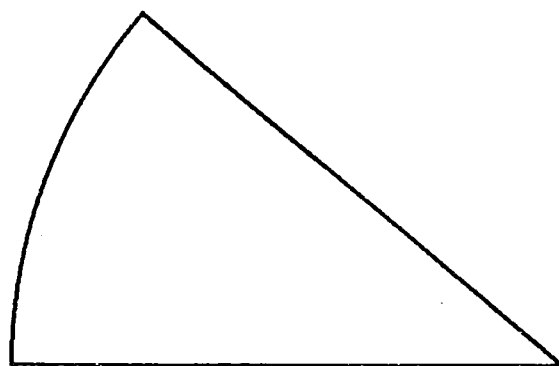
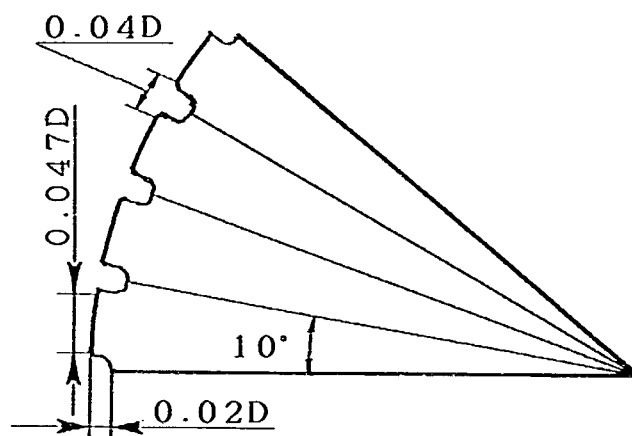


図-4.5.2 ケーブル模型の配置



(ノーマルケーブル)



(ストライプ方式ケーブル)

図-4.5.3 実験模型部分拡大図

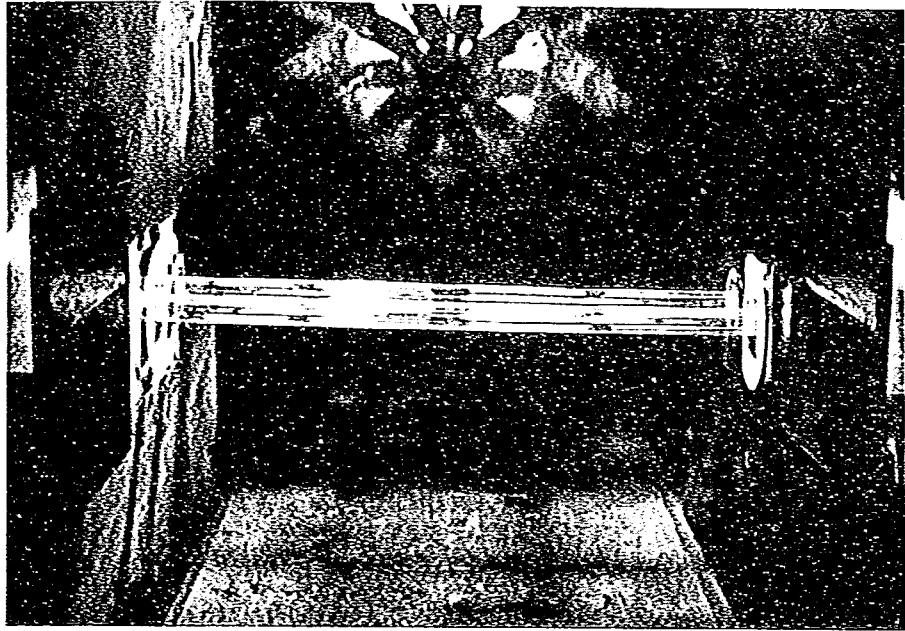


写真-4.5.1 ばね支持試験装置

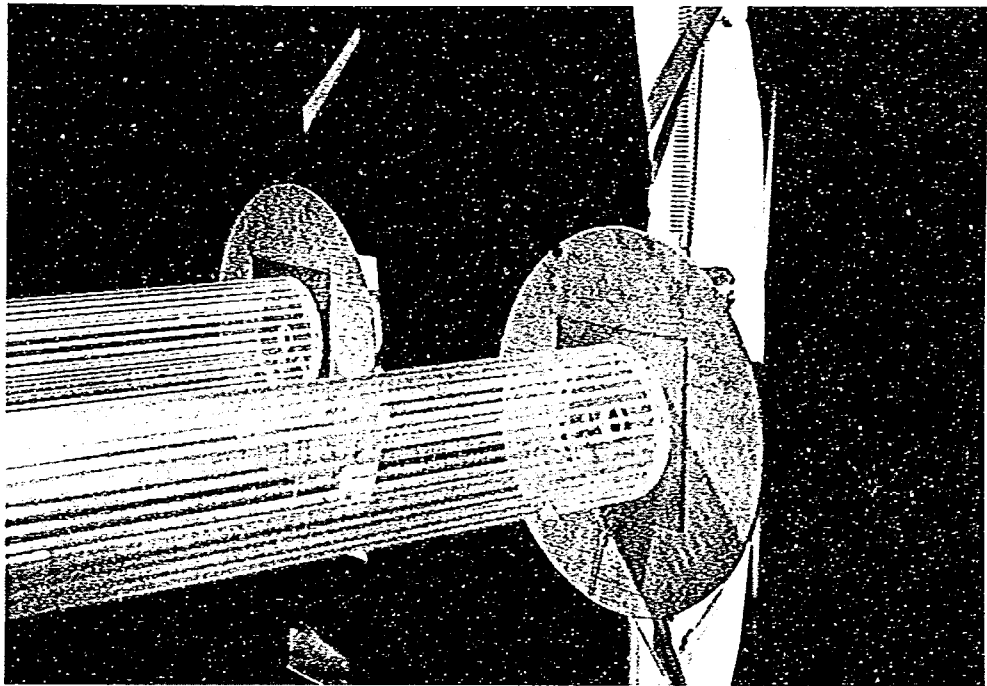


写真-4.5.2 ストライプ模型

(3) 実験結果と考察

図-4.5.3に空力対策模型（ストライプ方式ケーブル）と無対策のケーブル模型（ノーマルケーブル）の部分拡大図を示す。また、写真-4.5.1及び写真-4.5.2に実験の様子と空力対策模型を示す。

試験結果は、風速と振幅の関係（ $V-A$ 図）と、風速と振幅及び減衰率の関係（ $V-A-\delta$ 図）として整理した。試験対象ケースについての風速と振幅の関係（ $V-A$ 図）を図-4.5.12～25に示す。ここで、図中の○、△、▽印は、それぞれ平均振幅、最大振幅、最小振幅を示す。

また、風速と振幅及び減衰率の関係（V-A- δ 図）については、代表的な応答を示すケースの下流側ケーブルについて示した。図-4.5.26～30に、風速と振幅及び減衰率の関係（V-A- δ 図）を示す。

上流側ケーブルに主流直角方向に1自由度を与えたときのノーマルケーブルとストライプ方式ケーブルの平均応答振幅の比較を、ケーブル径 $D=50\text{mm}$ でケーブル間隔 $(Sh, Sv)=(2D, 0)$, $(3D, 0)$, $(4D, 0)$ の場合をそれぞれ図-4.5.4～9に示す。また、 $D=100\text{mm}$ の $(Sh, Sv)=(4D, 0)$ の場合を図-4.5.10, 11に示す。

$D=50, 100\text{mm}$ の場合とも、 $(Sh, Sv)=(4D, 0)$ ではストライプ方式の下流側ケーブルにはノーマルケーブルで見られた不安定振動が発現していない。このときの下流側ケーブルのV-A- δ 図（図-4.2.2.22と図-4.5.29, 図-4.2.2.23と図-4.5.30）を比較すると、両者は明らかに異なっており、作用する空気力が相違していることがわかる。

一方、 $(Sh, Sv)=(2D, 0)$, $(3D, 0)$ では、ノーマルケーブルとストライプ方式ケーブルの応答振幅は、同等か、あるいは風速域によってはストライプ方式ケーブルの方が大きくなっており、上流側ケーブルの振動も発生している。そして、発振風速もノーマルケーブルとストライプ方式ケーブルではあまり変化していない。また、ストライプ方式ケーブルの $(Sh, Sv)=(3.5D, 0)$, $(2D, D)$, $(3D, D)$ の場合、下流側ケーブルの最大振幅は1.5D以上となっており、上流側ケーブルの振動も発生している。よって、これらのケーブル間隔では、 $D=50, 100\text{mm}$ の $(Sh, Sv)=(4D, 0)$ で見られたような制振効果は期待できない。

以上より、ケーブル間隔によってはストライプ方式の空力制振対策はウェークギャロッピングに対して有効ではない場合もあるといえることができる。しかし、 $(Sh, Sv)=(4D, 0)$ の場合にはストライプ方式ケーブルの制振効果を認めることができる。つまり、ケーブルの間隔をある程度確保した場合（本研究では $Sh \geq 4D$ ）には、ストライプ方式はウェークギャロッピングに対しては制振効果を発揮する可能性があるといえる。ただし、今回の実験結果のみでストライプ方式のウェークギャロッピングに対する制振効果を評価することには無理があり、今後様々な角度からの検討が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所他；斜張橋並列ケーブルの耐風制振に関する共同研究報告書（その2），平成6年3月

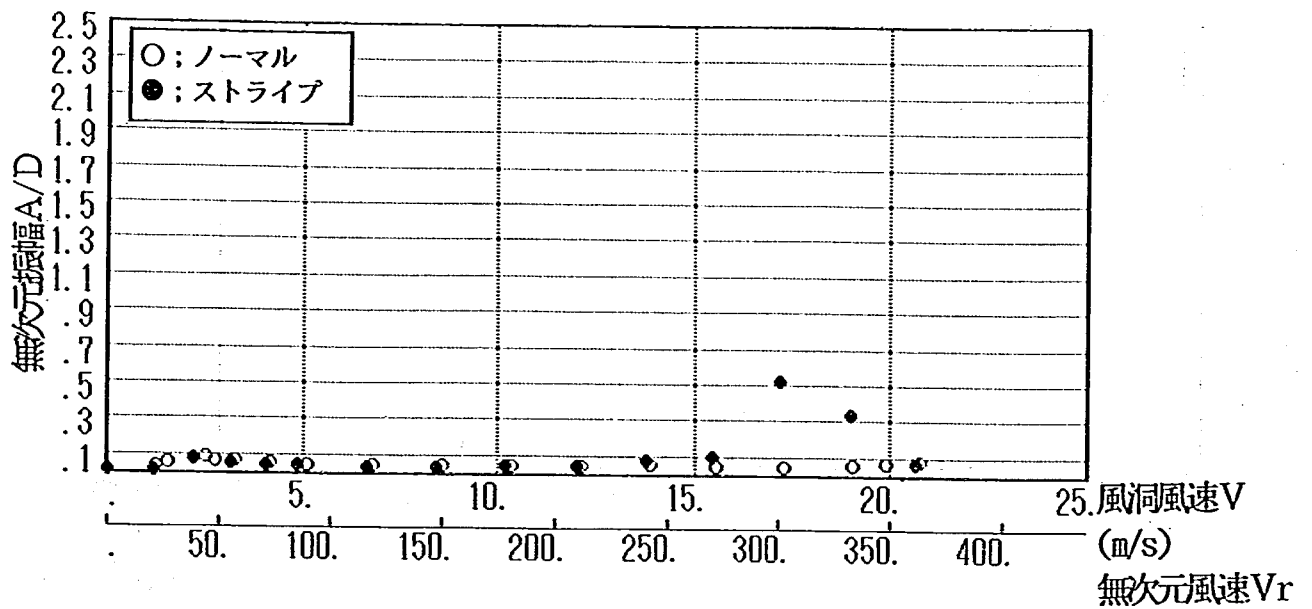


図-4.5.4 断面変化と上流側ケーブルの振動応答の関係

($D=50\text{mm}$ 、 $(Sh, Sv)=(20,0)$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

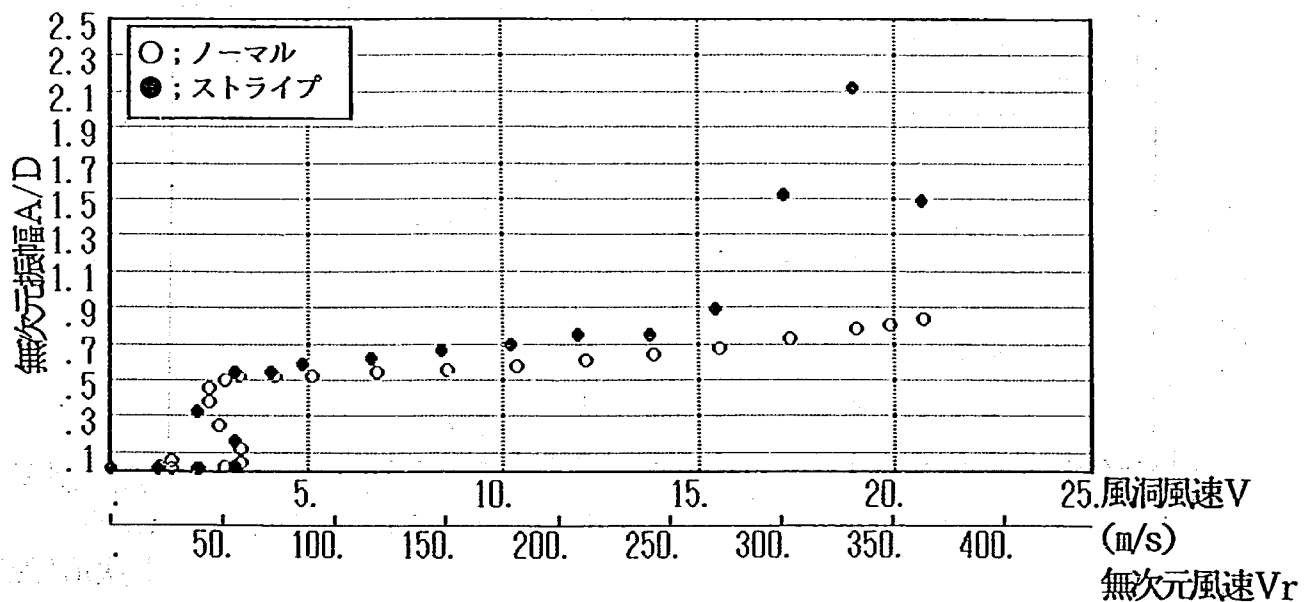


図-4.5.5 断面変化と下流側ケーブルの振動応答の関係

($D=50\text{mm}$ 、 $(Sh, Sv)=(20,0)$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

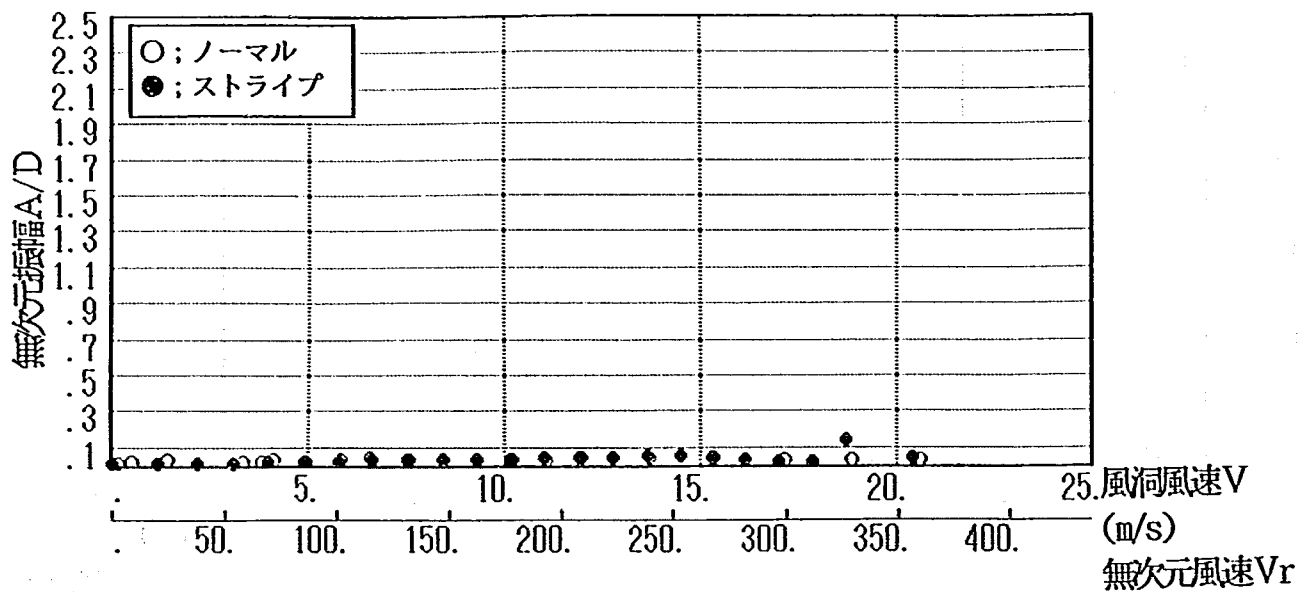


図-4.5.6 断面変化と上流側ケーブルの振動応答の関係
($D=50\text{mm}$ 、 $(Sh, Sv)=(30, 0)$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

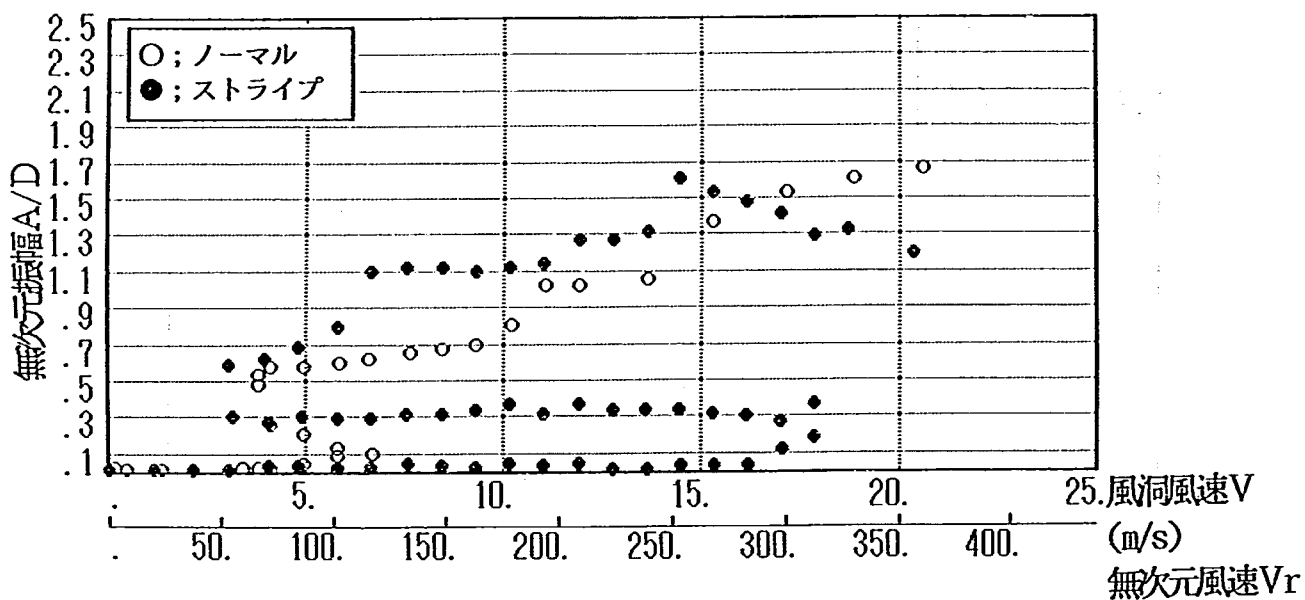


図-4.5.7 断面変化と下流側ケーブルの振動応答の関係
($D=50\text{mm}$ 、 $(Sh, Sv)=(30, 0)$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

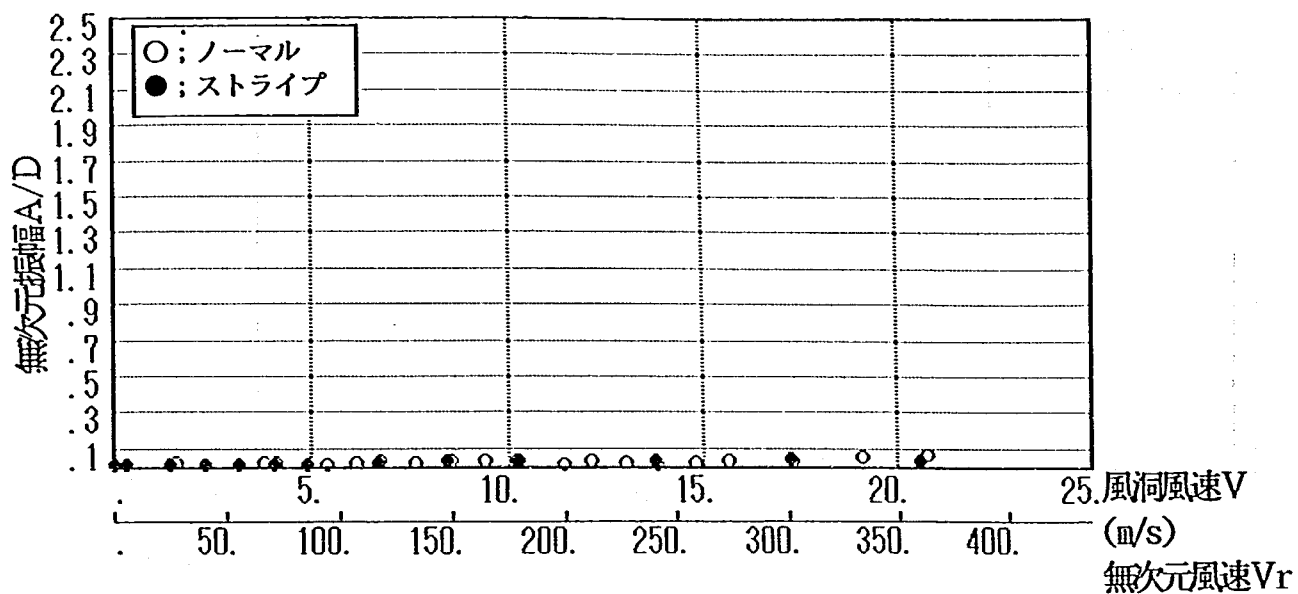


図-4.5.8 断面変化と上流側ケーブルの振動応答の関係
($D=50\text{mm}$ 、 $(Sh, Sv)=(40, 0)$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

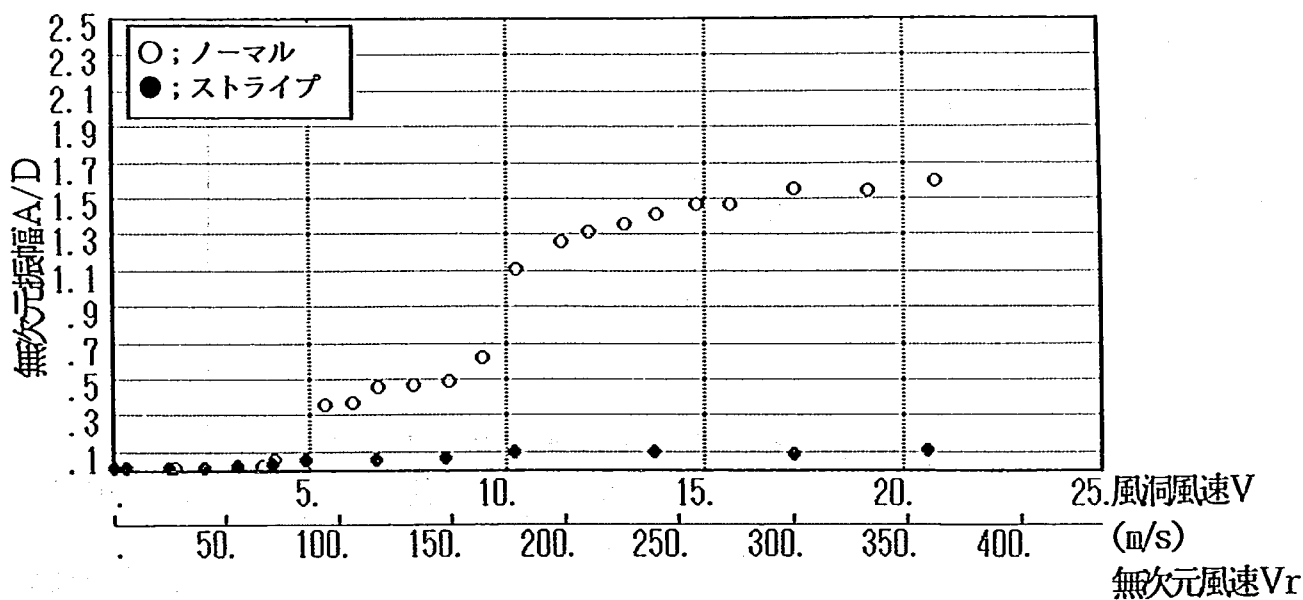


図-4.5.9 断面変化と下流側ケーブルの振動応答の関係
($D=50\text{mm}$ 、 $(Sh, Sv)=(40, 0)$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

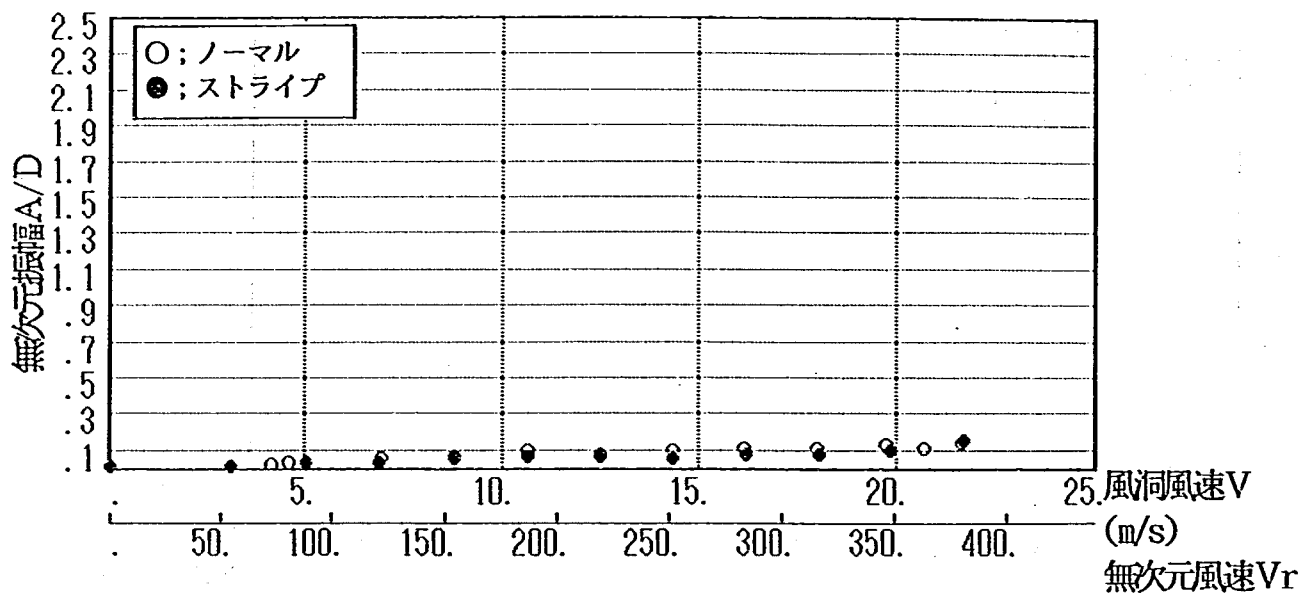


図-4.5.10 断面変化と上流側ケーブルの振動応答の関係
($D=100\text{mm}$ 、 $(Sh, Sv)=(40, 0)$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

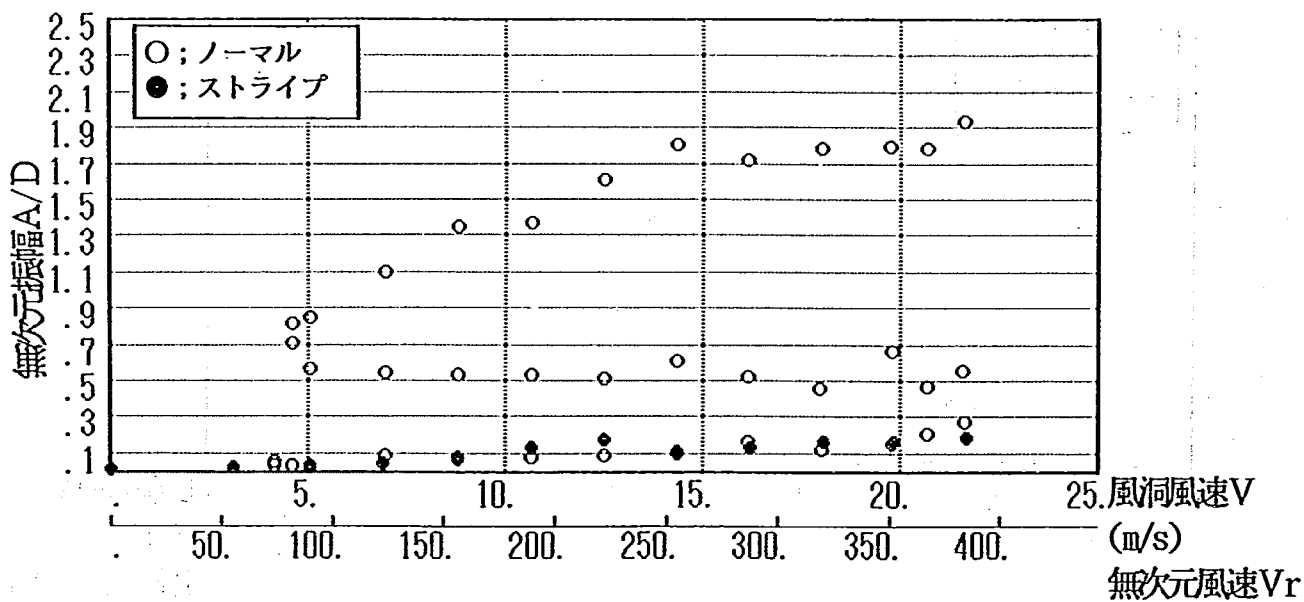


図-4.5.11 断面変化と下流側ケーブルの振動応答の関係
($D=100\text{mm}$ 、 $(Sh, Sv)=(40, 0)$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

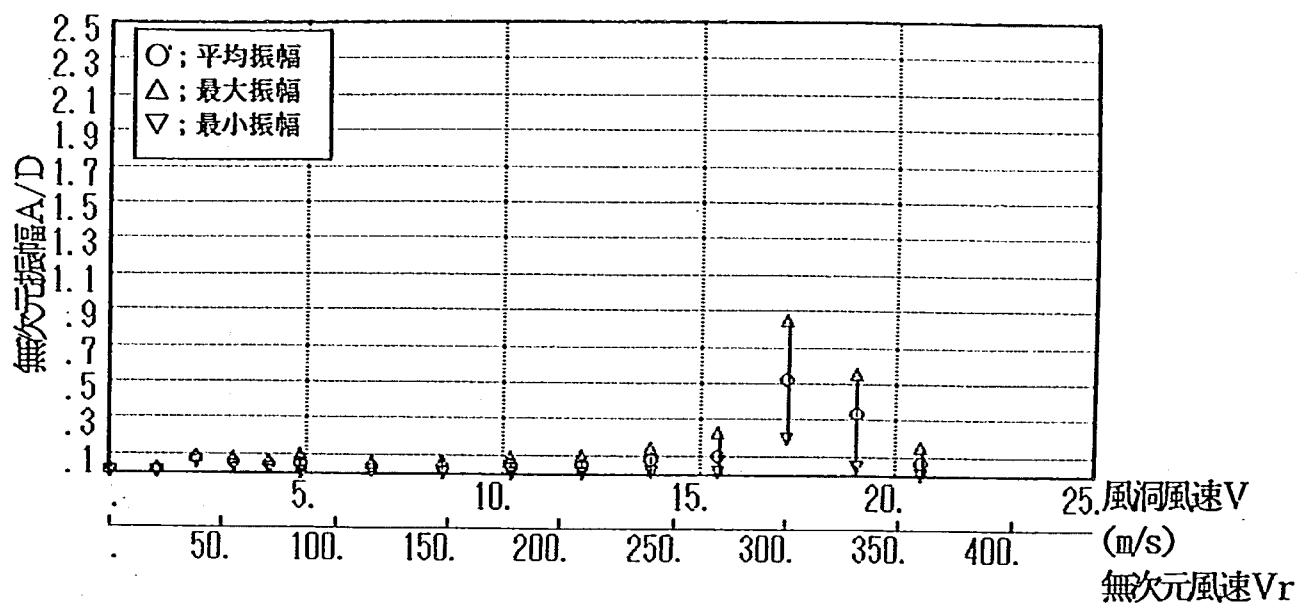


図-4.5.12 $(Sh, Sv) = (20, 0)$ での上流側ケーブルの風速と振幅の関係；試験番号 1
(ストライプ、 $D=50\text{mm}$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

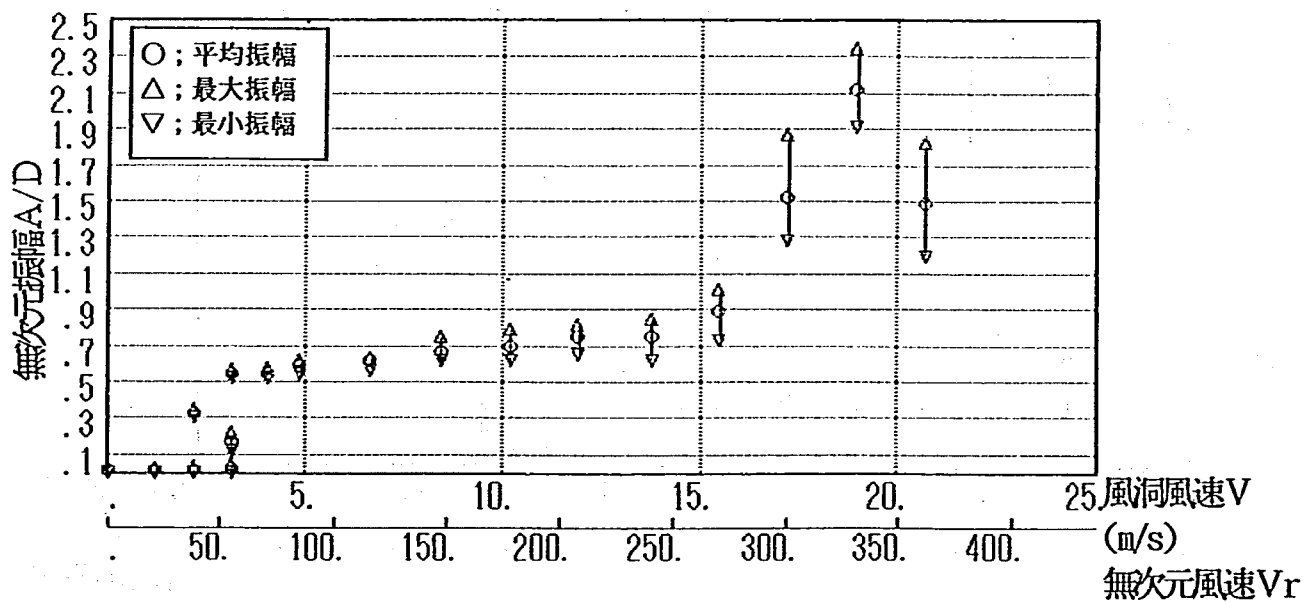


図-4.5.13 $(Sh, Sv) = (20, 0)$ での下流側ケーブルの風速と振幅の関係；試験番号 1
(ストライプ、 $D=50\text{mm}$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

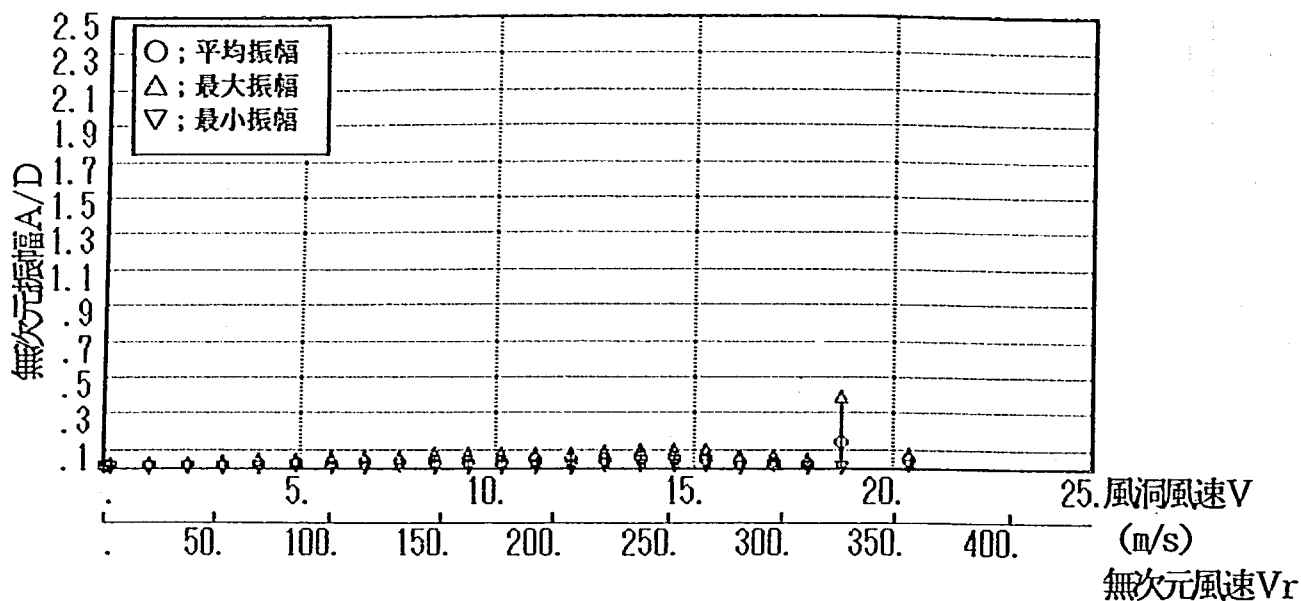


図-4.5.14 $(Sh, Sv) = (30, 0)$ での上流側ケーブルの風速と振幅の関係；試験番号 2
(ストライプ、 $D=50\text{mm}$ 、上流側；1 自由度、下流側；1 自由度)

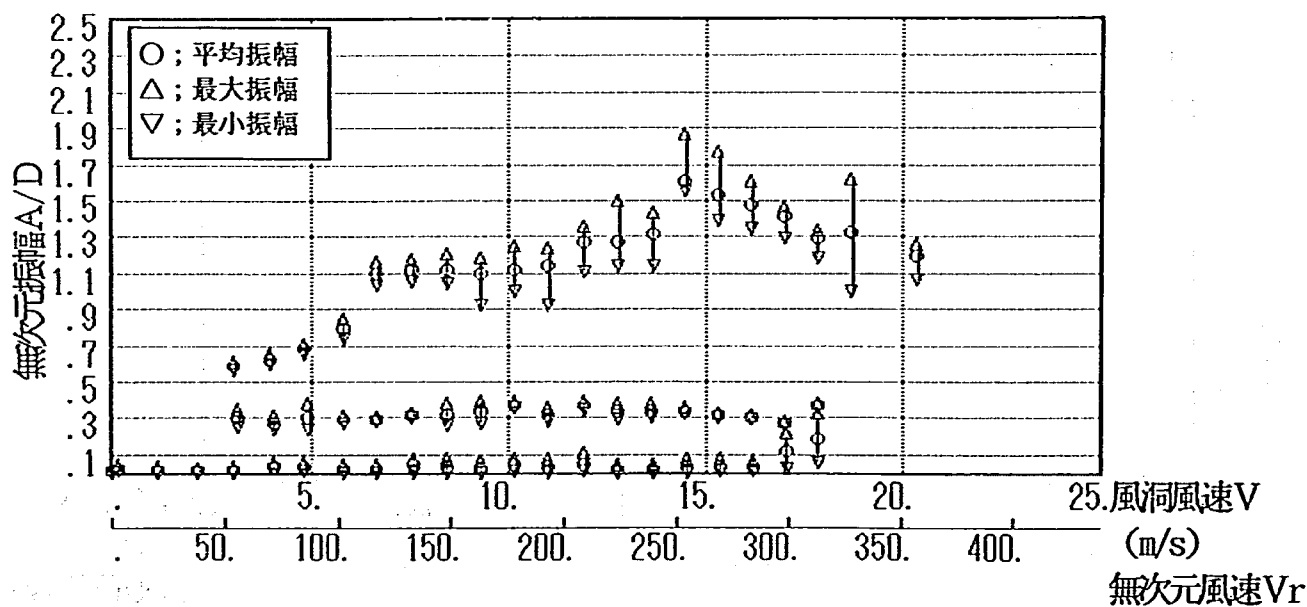


図-4.5.15 $(Sh, Sv) = (30, 0)$ での下流側ケーブルの風速と振幅の関係；試験番号 2
(ストライプ、 $D=50\text{mm}$ 、上流側；1 自由度、下流側；1 自由度)

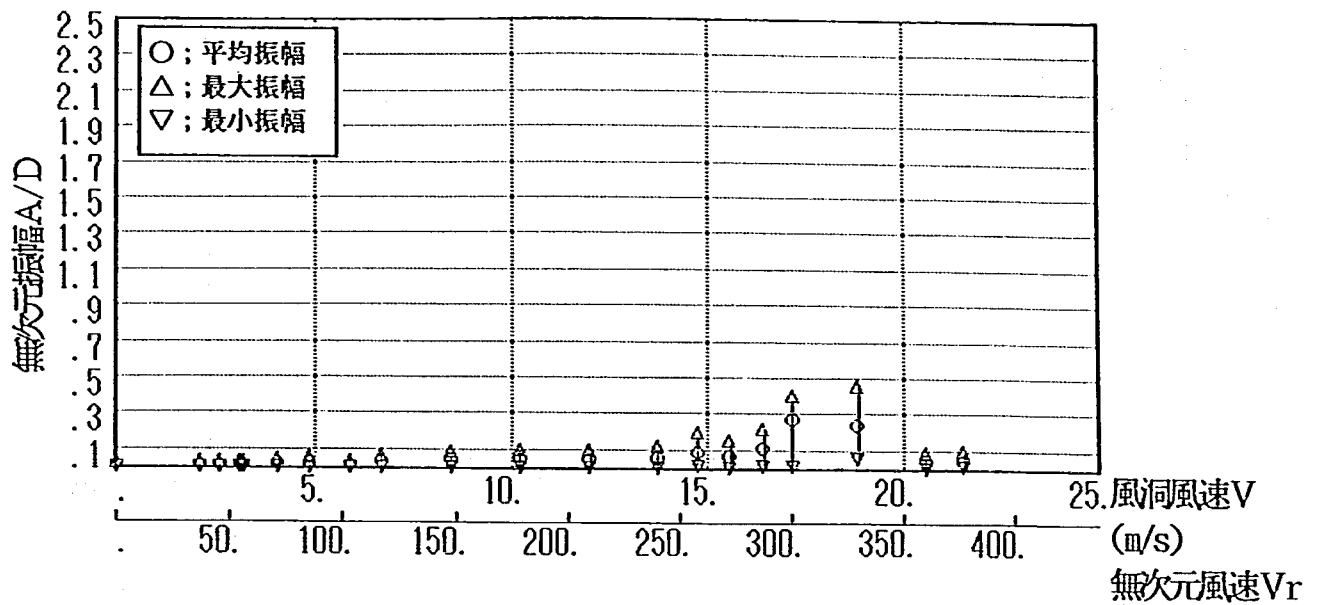


図-4.5.16 $(Sh, Sv) = (3.50, 0)$ での上流側ケーブルの風速と振幅の関係；試験番号 3
(ストライプ、 $D=50\text{mm}$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

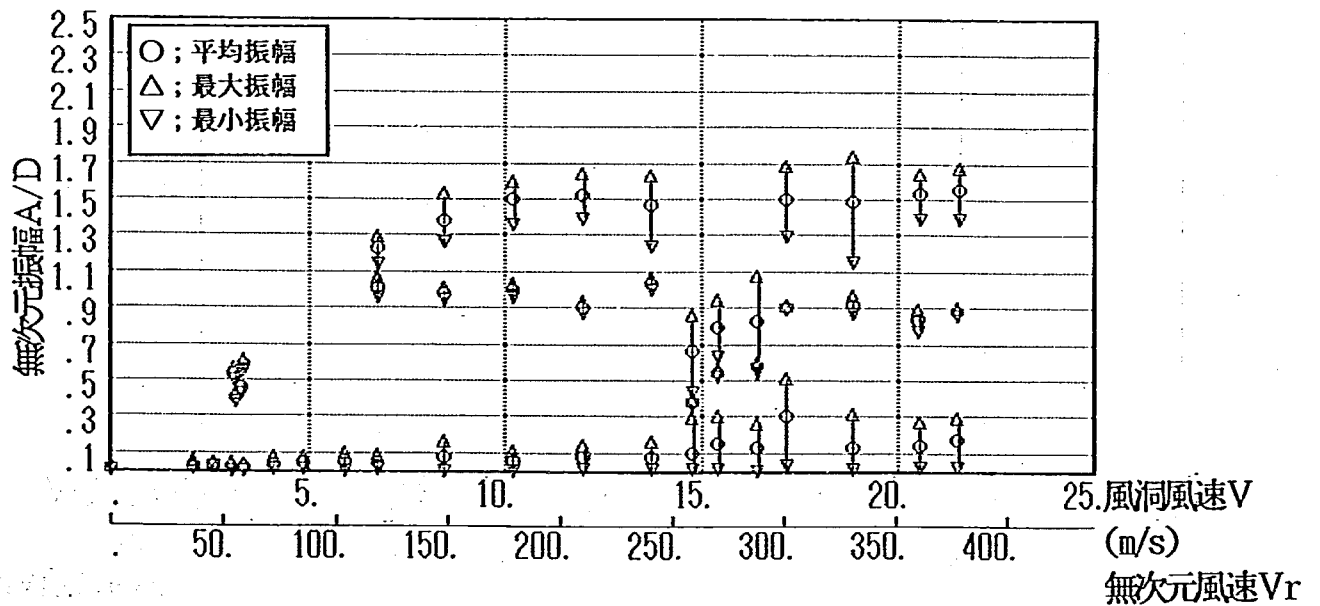


図-4.5.17 $(Sh, Sv) = (3.50, 0)$ での下流側ケーブルの風速と振幅の関係；試験番号 3
(ストライプ、 $D=50\text{mm}$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

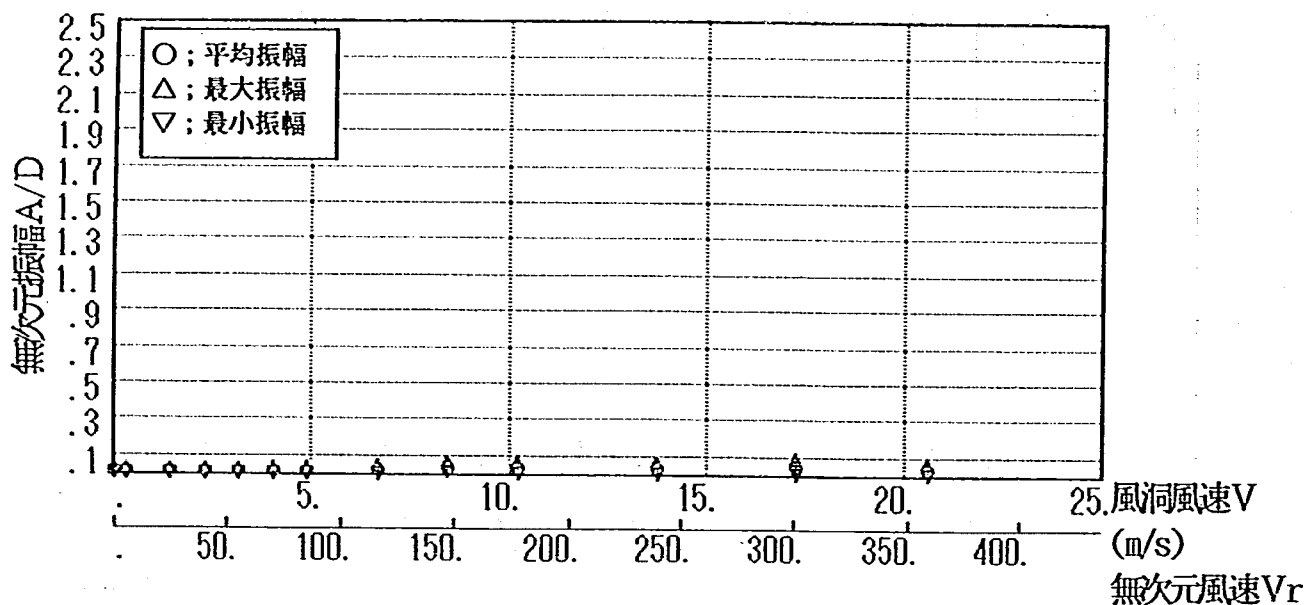


図-4.5.18 $(Sh, Sv) = (40, 0)$ での上流側ケーブルの風速と振幅の関係；試験番号 4
(ストライプ、 $D = 50\text{mm}$ 、上流側；1 自由度、下流側；1 自由度)

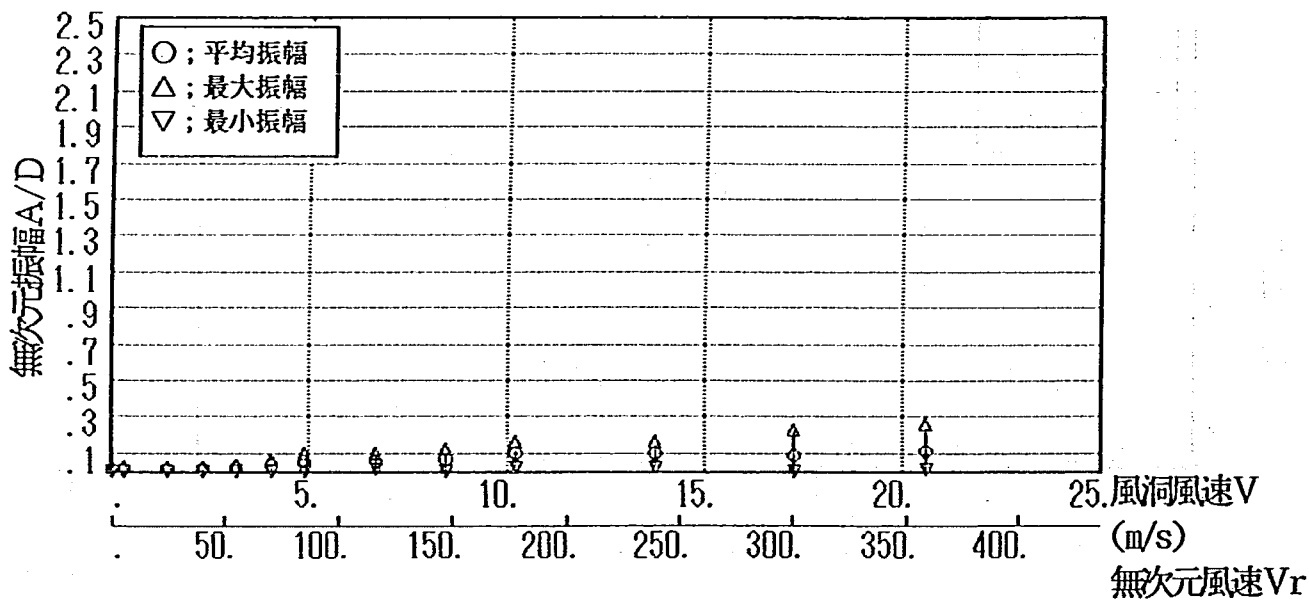


図-4.5.19 $(Sh, Sv) = (40, 0)$ での下流側ケーブルの風速と振幅の関係；試験番号 4
(ストライプ、 $D = 50\text{mm}$ 、上流側；1 自由度、下流側；1 自由度)

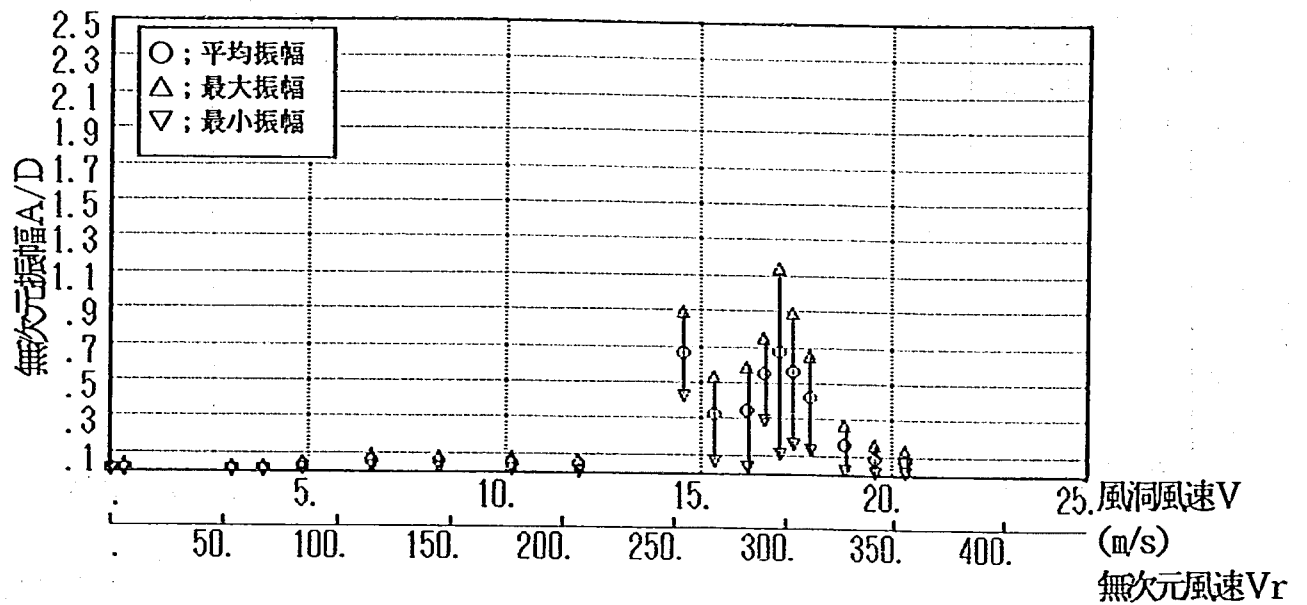


図-4.5.20 $(Sh, Sv) = (20, 0)$ での上流側ケーブルの風速と振幅の関係; 試験番号 5
(ストライプ、 $D=50\text{mm}$ 、上流側; 1自由度、下流側; 1自由度)

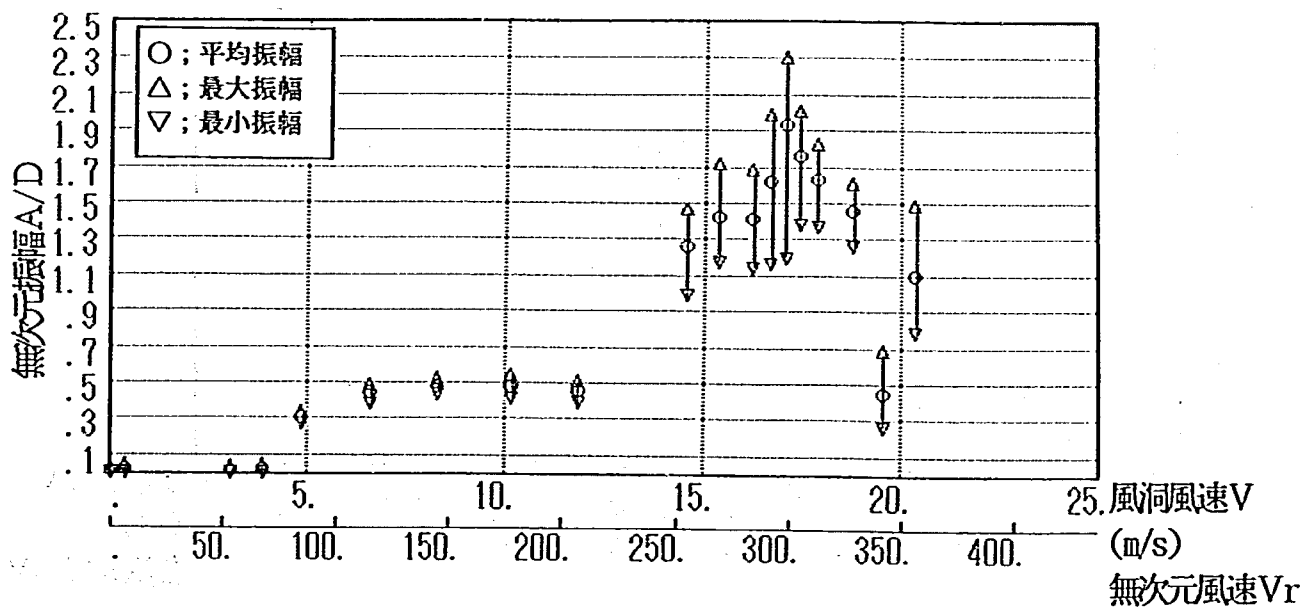


図-4.5.21 $(Sh, Sv) = (20, 0)$ での下流側ケーブルの風速と振幅の関係; 試験番号 5
(ストライプ、 $D=50\text{mm}$ 、上流側; 1自由度、下流側; 1自由度)

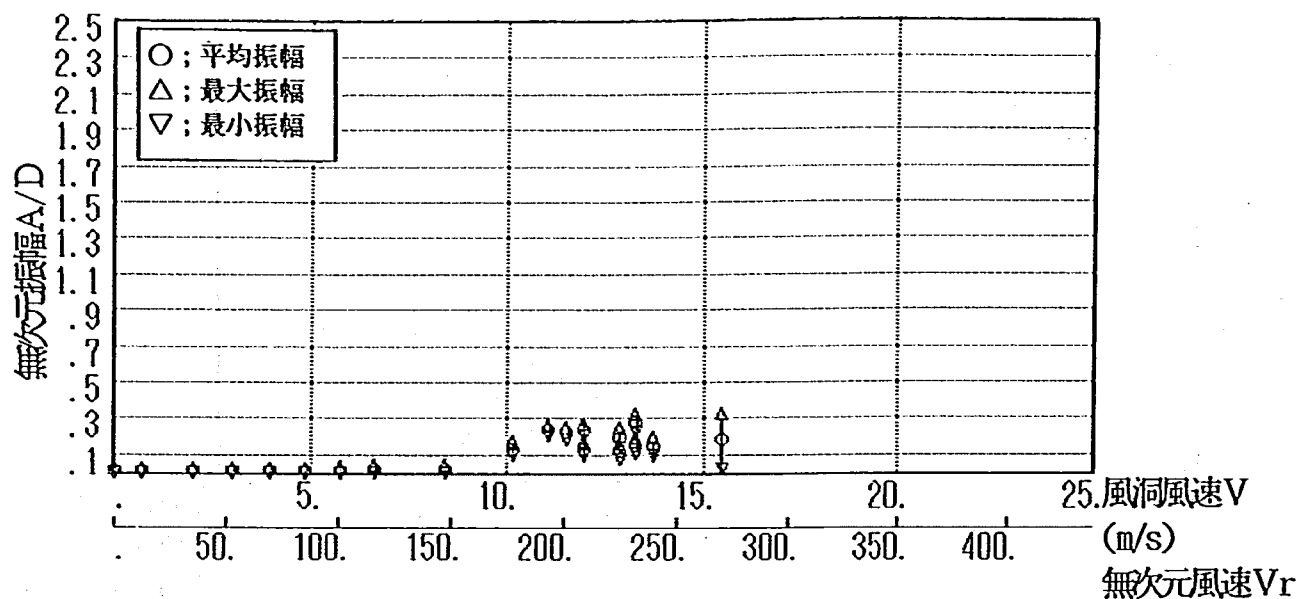


図-4.5.22 $(Sh, Sv) = (3D, D)$ での上流側ケーブルの風速と振幅の関係 ; 試験番号 6

(ストライプ、 $D=50\text{mm}$ 、上流側 ; 1 自由度、下流側 ; 1 自由度)

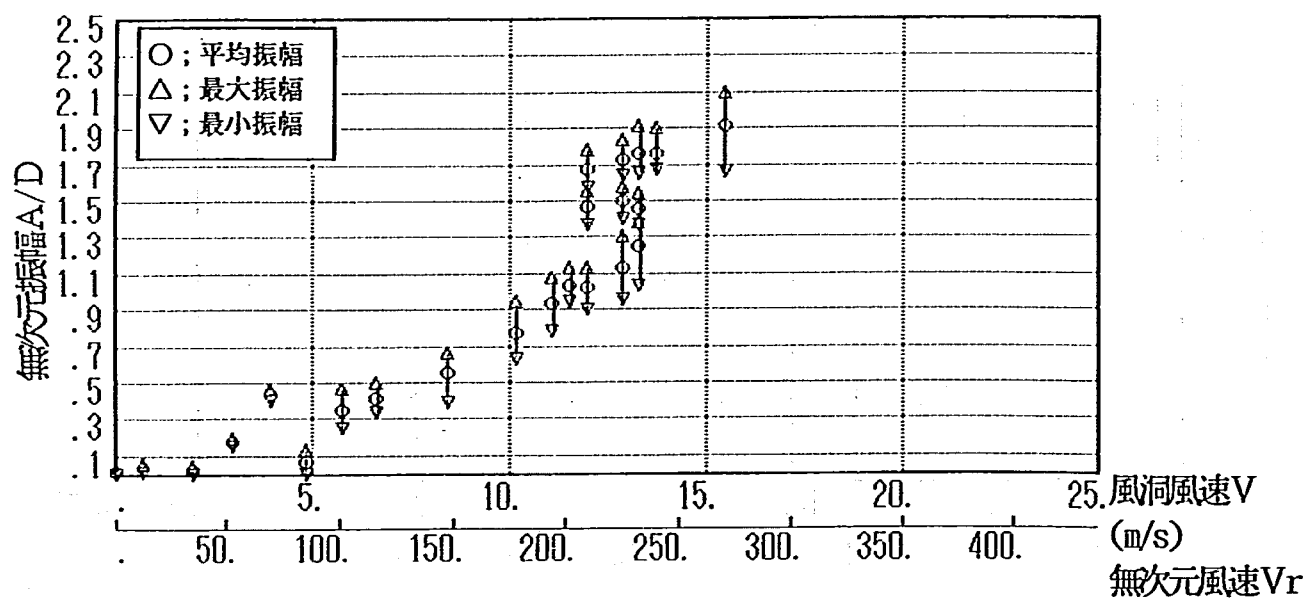


図-4.5.23 $(Sh, Sv) = (3D, D)$ での下流側ケーブルの風速と振幅の関係 ; 試験番号 6

(ストライプ、 $D=50\text{mm}$ 、上流側 ; 1 自由度、下流側 ; 1 自由度)

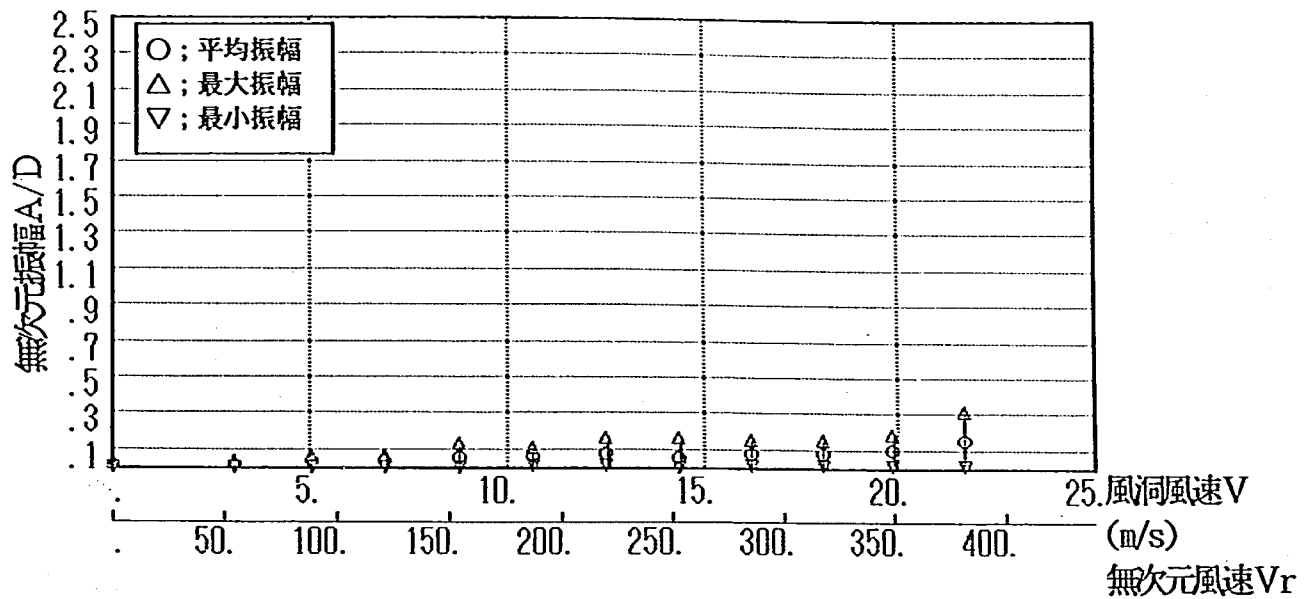


図-4.5.24 $(Sh, Sv) = (40, 0)$ での上流側ケーブルの風速と振幅の関係；試験番号 7

(ストライプ、 $D=100\text{mm}$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

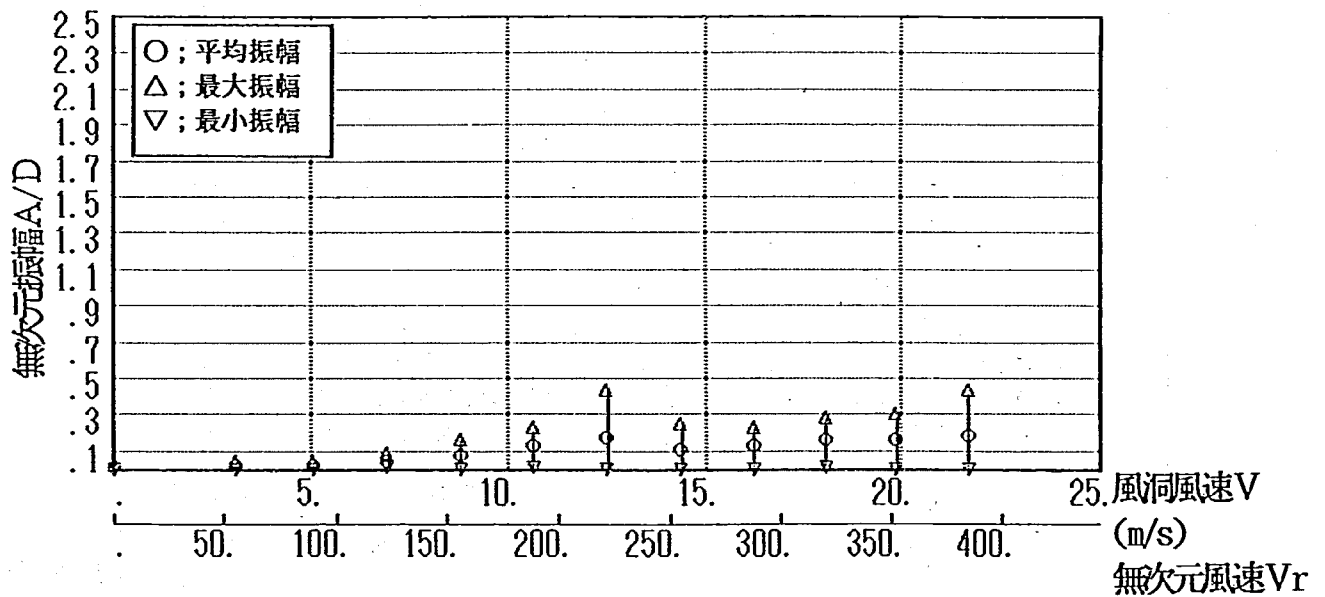


図-4.5.25 $(Sh, Sv) = (40, 0)$ での下流側ケーブルの風速と振幅の関係；試験番号 7

(ストライプ、 $D=100\text{mm}$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

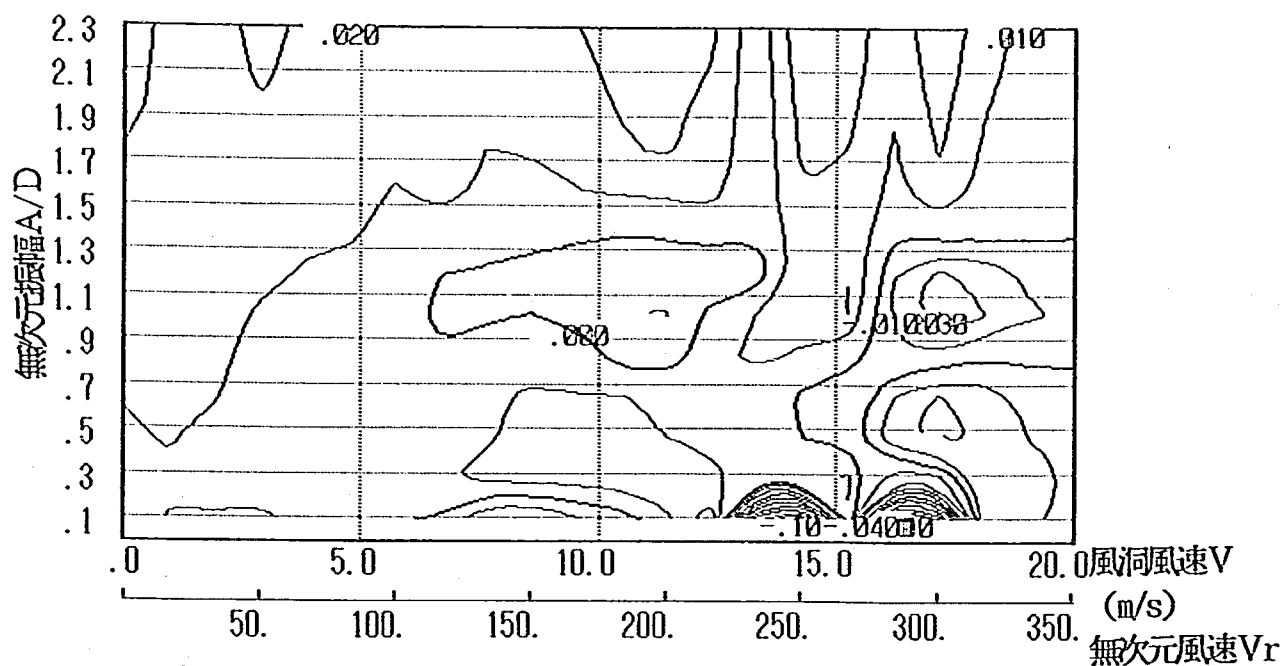


図-4.5.28 $(Sh, Sv) = (3.50, 0)$ での下流側ケーブルの風速と振幅および減衰率の関係；試験番号 3
(ストライプ、 $D = 50\text{mm}$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

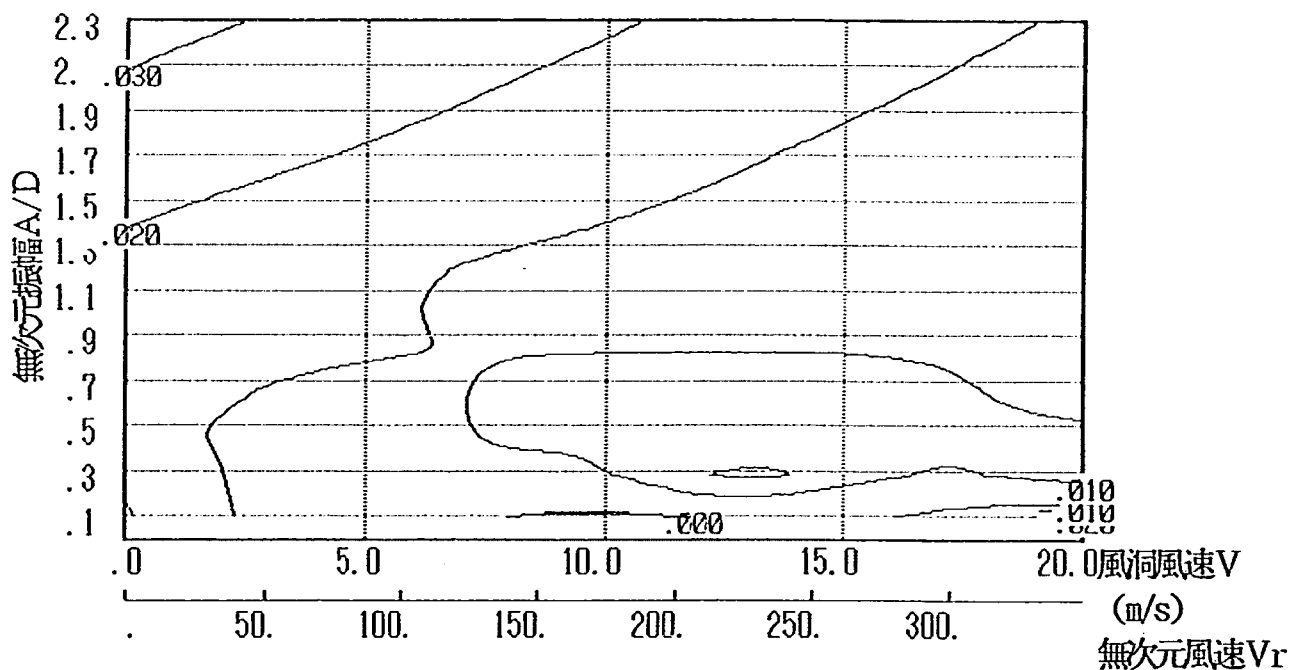


図-4.5.29 $(Sh, Sv) = (40, 0)$ での下流側ケーブルの風速と振幅および減衰率の関係；試験番号 4
(ストライプ、 $D = 50\text{mm}$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

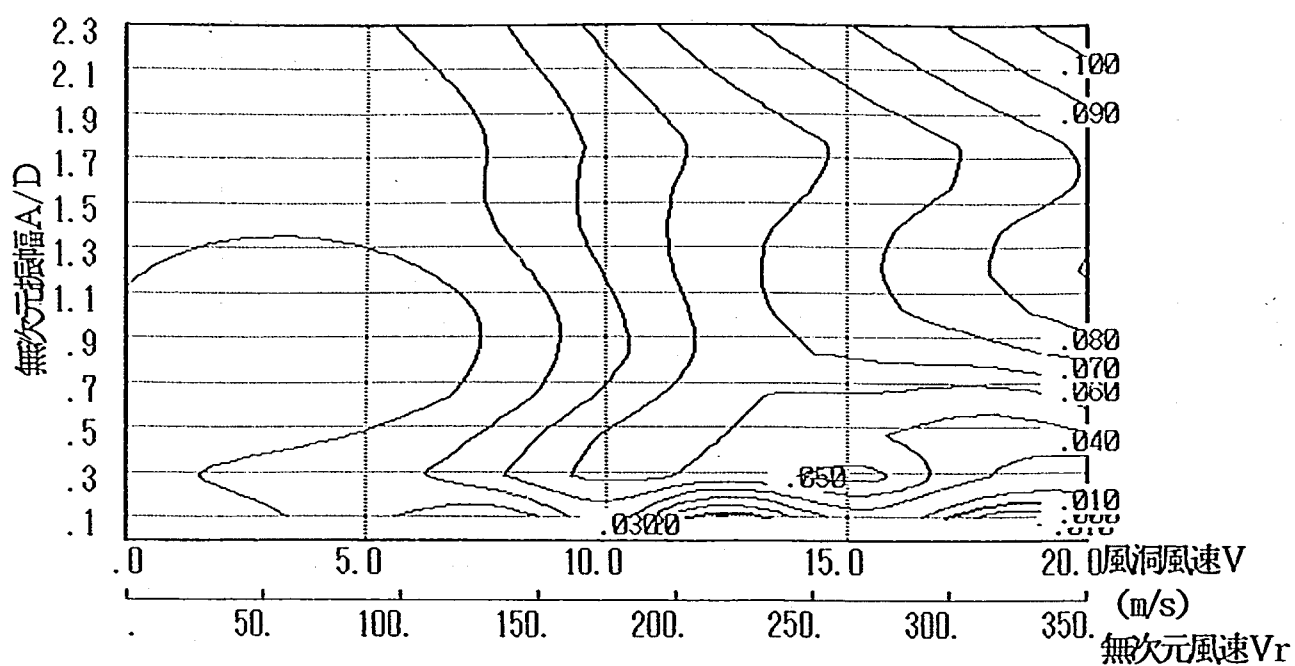


図-4.5.30 $(Sh, Sv) = (40, 0)$ での下流側ケーブルの風速と振幅および減衰率の関係；試験番号7
 (ストライプ、 $D=100\text{mm}$ 、上流側；1自由度、下流側；1自由度)

4.6 数値解析による制振効果の評価に関する研究

(1) 研究の目的

ウェークギャロッピングに対する機械的制振装置には、通常、ケーブルの相互連結、スパーサー連結、せん断ダンパー、高減衰ゴム等が用いられている。これらの制振装置のうち、後者のせん断ダンパーおよび高減衰ゴムについては取り付け位置と付加減衰の関係に関する幾つかの研究成果が報告されているが、前者の相互連結およびスパーサー連結装置に対しては、取り付け位置と制振効果の関係について系統的に整理されたものは少ない。本研究では、スパーサー連結およびスパーサーと相互連結装置の組合せによる制振機構について、取り付け位置とその制振効果の関係をパラメトリックに解析整理することにより、同制振装置を適用する場合の基礎資料を得ることを目的とする。なお、スパーサー連結については、減衰機構に着目した詳細な研究がなされていることから、ここではスパーサーと相互連結材の組合せに主眼を置き、その前段階の概略的な特性について解析するものとする。

本年度の研究は、スパーサーと相互連結材の組合せによる制振機構についての検討およびケーブル相互連結時にワイヤーに発生する張力の評価についての検討を行った。

(2) 研究内容

スパーサーと相互連結材の組合せによる制振効果は、図-4.6.1に示す中央径間450m（最大ケーブル長200m程度）の3径間連続斜張橋を解析対象橋梁として解析を行い検討する。表-4.6.1に解析対象橋梁の諸元を示す。

スパーサーと相互連結材の組合せによる制振効果は、復素固有値解析による各次モードの振動数、対数減衰率、モード振幅を用いて振動数効果、減衰効果および質量効果について検討する。

解析モデルは、図-4.6.1に示した解析対象橋梁を図-4.6.2に示すような斜張橋全体の1/2モデルとし、桁中央の支持条件を変えて対象モードを求める。解析ケースは制振対策前と減衰機構付きスパーサー＋相互連結材の2種類において、取り付け位置を変化させた効果を検討する。

主桁および主塔の減衰係数については、各々の卓越モードの対数減衰率が0.03となるように設定する。ケーブルについては、それぞれのケーブルの1次振動モードの対数減衰率が0.01となるように設定する。連結材の減衰係数は、0として設定する。各構造別の自由度を表4.6.2に示す。

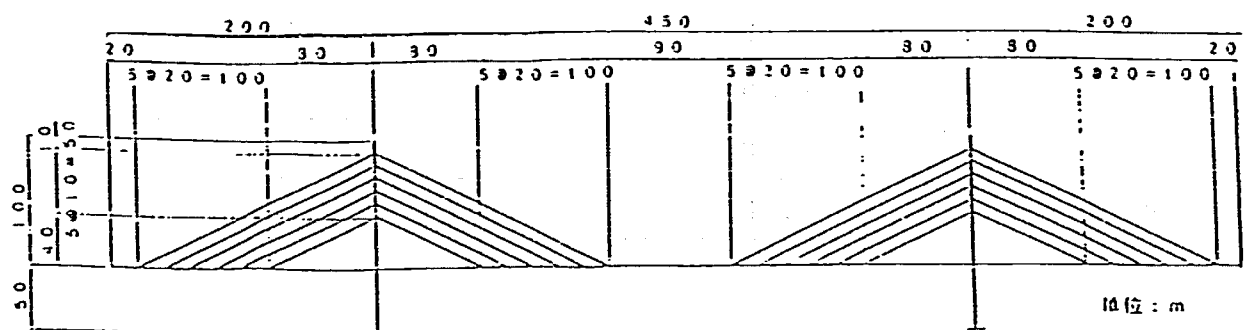


図-4.6.1 解析対象橋梁

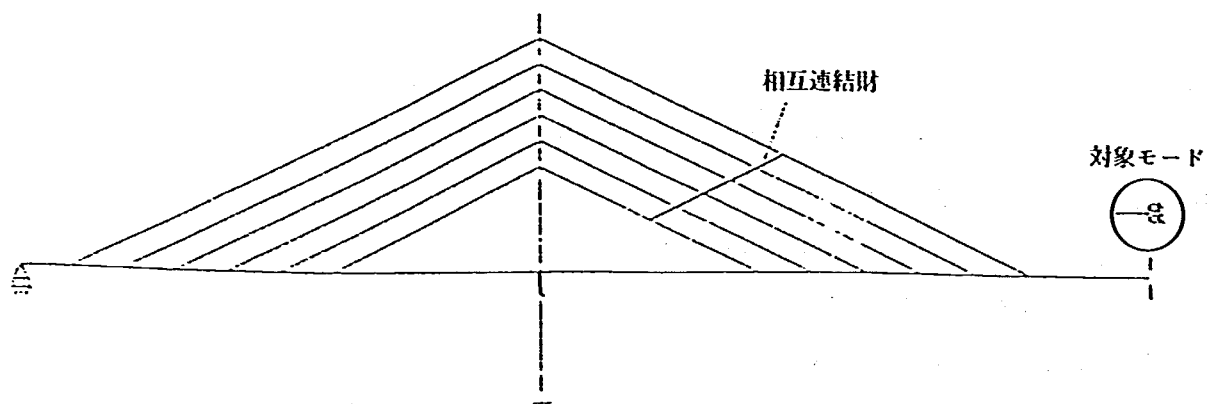


図-4.6.2 解析モデル

表-4.6.1 斜張橋諸元 (1/2 Br.)

項 目		諸 元 値	項 目		諸 元 値
主 桁	橋 長 (m)	200+450+200	ケー ブル (1本)	ケーブル長 (m)	200.0 (最大)
	単位重量 (tf/m)	15.0		単位重量 (tf/m)	0.110
	断 面 積 (㎡)	0.5		導入張力 (tf)	500.0
	断面剛性 (㎡)	7.0		断 面 積 (㎡)	0.014
主 塔	塔 高 (m)	150.0	連 結 材	断 面 積 (㎡)	0.00038
	単位重量 (tf/m)	15.0		単位重量 (tf/m)	0.0031
	断 面 積 (㎡)	0.5		導入張力 (tf)	2.0
	断面剛性 (㎡)	3.0	ス ペ ー サ	バネ定数 (tf/m)	10.0
				減衰係数 (tfs/m)	2.5

	ヤ ン グ 率 (tf / ㎡)	せん断弾性係数 (tf / ㎡)
主 桁	2.1×10^7	8.1×10^5
主 塔	2.1×10^7	8.1×10^5
ケー ブ ル	2.0×10^7	—
連 結 材	1.4×10^7	—

表-4.6.2 各構造別解析自由度

	X 方 向	Y 方 向
主 桁	×	○
主 塔	○	×
ケーブル	○	○

表-4.6.3 解析ケース

	連 結 材 設 置 位 置
CASE 1-1-1	無対策
CASE 2-1-1	$1/2 \cdot L$ 点連結
CASE 2-1-2	$1/4 \cdot L$ 点連結
CASE 2-1-3	$1/8 \cdot L$ 点連結

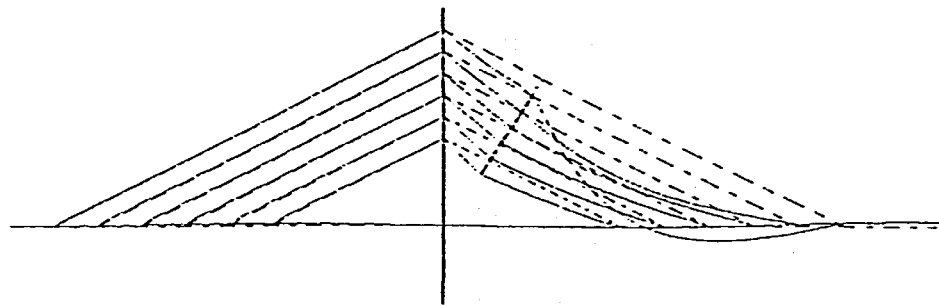
表-4.6.4(1) 対称モードでの固有値解析結果

	モード No.	振 動 数 (Hz)	対数減衰率 δ	一般化質量比			備 考
				桁	塔	ケーブル	
CASE1-1-1	1	0.2682	0.03250	0.92126	0.05780	0.02090	桁鉛直対称 1 次振動
	2	0.5204	0.01052	0.01365	0.00091	0.98544	1 段目ケーブル 1 次振動
	4	0.5861	0.01190	0.04997	0.00211	0.94792	2 段目ケーブル 1 次振動
	6	0.6208	0.04095	0.89889	0.02675	0.07414	桁鉛直対称 2 次振動
	8	0.6703	0.01017	0.01020	0.00027	0.98952	3 段目ケーブル 1 次振動
	9	0.7807	0.01004	0.00395	0.00012	0.99594	4 段目ケーブル 1 次振動
	11	0.9334	0.01131	0.04693	0.00034	0.95270	5 段目ケーブル 1 次振動
	13	1.0161	0.02877	0.61881	0.01105	0.36974	1 段目ケーブル 2 次振動 (桁と連成, 逆対称)
	15	1.0257	0.02426	0.28894	0.00507	0.70582	1 段目ケーブル 2 次振動 (桁と連成, 逆対称)
	17	1.1500	0.01936	0.00131	0.00002	0.99868	2 段目ケーブル 2 次振動 (逆対称)
	19	1.1747	0.01031	0.01956	0.00203	0.97838	6 段目ケーブル 1 次振動
	20	1.3139	0.01942	0.00214	0.00018	0.99768	3 段目ケーブル 2 次振動 (逆対称)
CASE2-1-1	1	0.2684	0.03252	0.92269	0.05792	0.01934	桁鉛直対称 1 次振動
	2	0.6156	0.04323	0.94267	0.02807	0.02922	桁鉛直対称 2 次振動
	3	0.7048	0.01054	0.03398	0.00085	0.96516	ケーブル 1 次振動
	5	1.0068	0.03159	0.76153	0.01234	0.22564	1 段目ケーブルサブスパン振動 (桁と連成)
	7	1.0237	0.02016	0.04518	0.00065	0.95414	1 段目ケーブル 2 次振動 (逆対称)
	8	1.0519	0.02072	0.15579	0.00374	0.84036	1 段目ケーブルサブスパン振動 (桁と連成)
	11	1.1500	0.01936	0.00133	0.00002	0.99864	2 段目ケーブル 2 次振動 (逆対称)
	12	1.1859	0.01781	0.01109	0.00062	0.98828	2 段目ケーブルサブスパン振動
	14	1.3139	0.01942	0.00210	0.00017	0.99774	3 段目ケーブル 2 次振動 (逆対称)
	16	1.3662	0.01773	0.00230	0.00027	0.99744	3 段目ケーブルサブスパン振動
	18	1.5324	0.01971	0.00798	0.00131	0.99072	4 段目ケーブル 2 次振動 (逆対称)
	20	1.6124	0.01927	0.01658	0.00181	0.98160	4 段目ケーブルサブスパン振動

表-4.6.4(2) 対称モードでの固有値解析結果

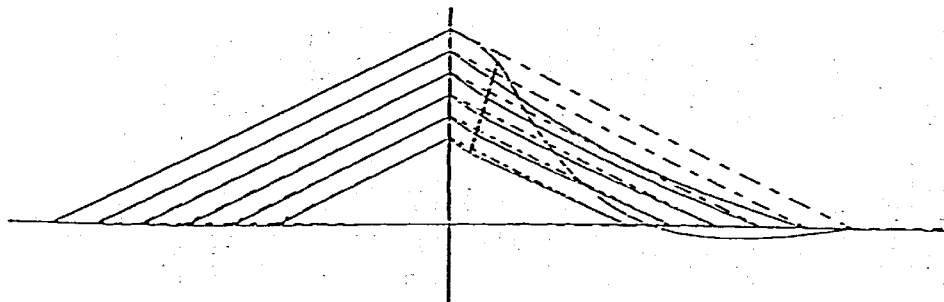
CASE2-1-2	1	0.2684	0.03251	0.92213	0.05788	0.01996	桁鉛直対称 1 次振動
	2	0.6103	0.03816	0.76834	0.02528	0.20622	桁鉛直対称 2 次振動
	3	0.6499	0.01653	0.20384	0.00467	0.79142	1 段目ケーブル 1 次振動
	5	0.7421	0.01258	0.00253	0.00011	0.99736	2 段目ケーブル 1 次振動
	7	0.8450	0.01291	0.00827	0.00008	0.99164	3 段目ケーブル 1 次振動
	9	0.9715	0.01574	0.11729	0.00129	0.88136	4 段目ケーブル 1 次振動
	11	1.0235	0.03234	0.83913	0.01571	0.14462	桁鉛直対称 3 次振動 (4 段目ケーブル連成)
	12	1.1457	0.01430	0.00846	0.00046	0.99108	5 段目ケーブル 1 次振動
	14	1.2881	0.01950	0.00383	0.00016	0.99600	1 段目ケーブル 2 次振動, 5 段目ケーブル連成
	16	1.3977	0.02060	0.00207	0.00045	0.99748	1 段目ケーブル 2 次振動, 6 段目ケーブル連成
	18	1.5004	0.02009	0.00147	0.00081	0.99770	2 段目ケーブル 2 次振動, 6 段目ケーブル連成
	20	1.5040	0.02820	0.18387	0.05120	0.76492	格段ケーブル複合振動
CASE2-1-3	1	0.2683	0.03251	0.92168	0.05784	0.02044	桁鉛直対称 1 次振動
	2	0.5739	0.01409	0.08488	0.00389	0.91122	1 段目ケーブル 1 次振動
	4	0.6212	0.03934	0.85125	0.02523	0.12332	桁鉛直対称 2 次振動
	5	0.6548	0.01185	0.03629	0.00084	0.96286	2 段目ケーブル 1 次振動
	7	0.7526	0.01105	0.00276	0.00011	0.99712	3 段目ケーブル 1 次振動
	9	0.8658	0.01139	0.01207	0.00011	0.98782	4 段目ケーブル 1 次振動
	11	1.0054	0.02742	0.64022	0.00982	0.34956	桁鉛直対称 3 次振動, 5 段目ケーブル連成
	12	1.0448	0.01909	0.31778	0.00748	0.67452	5 段目ケーブル 1 次振動, 桁と連成
	14	1.1348	0.02019	0.00241	0.00002	0.99758	1 段目ケーブル 2 次振動
	16	1.2596	0.01697	0.00145	0.00024	0.99832	2 段目ケーブル 2 次振動, 他段ケーブルと連成
	18	1.3027	0.01598	0.00378	0.00084	0.99536	6 段目ケーブル 1 次振動
	20	1.4595	0.02118	0.00460	0.00087	0.99452	3 段目ケーブル 2 次振動

CASE-2-1-2



MOOE NO 5	FREQUENCY	0.6499	CM. 3	0.39571
	PERIOO	1,589	CM. 4	0.39571
MAX.OIR Y			CM. 1	0.20384
			CM. 2	0.00467
			CM. 5	0.0006

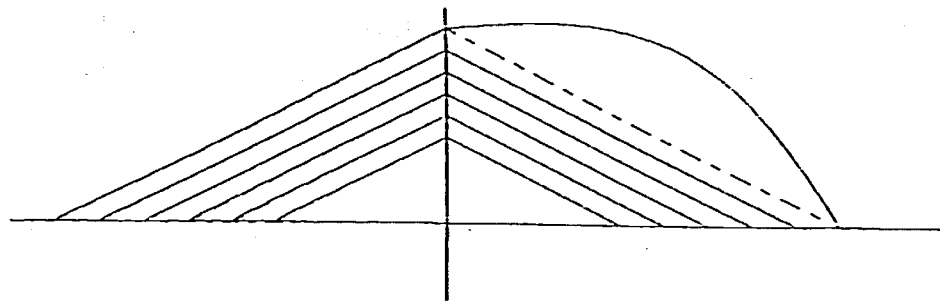
CASE-2-1-3



MOOE NO 3	FREQUENCY	0.5739	CM. 4	0.45561
	PERIOO	1.743	CM. 3	0.45561
MAX.OIR Y			CM. 1	0.08488
			CM. 2	0.00389
			CM. 5	0.00001

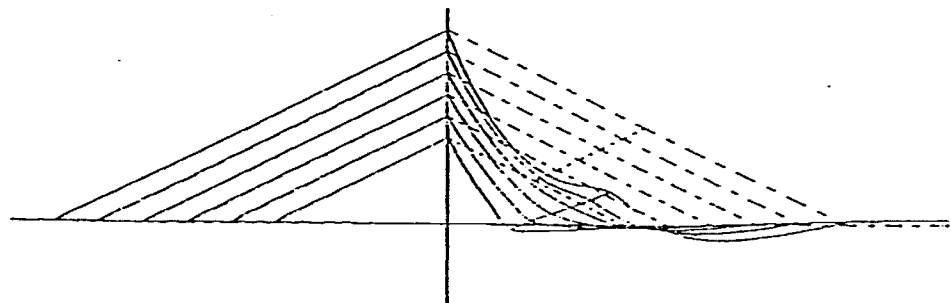
図-4.6.3(1) 振動モード図

CASE-1-1-1



MOOE NO 3	FREQUENCY	0.5203	CM. 4	0.49272
	PERIOO	1.922	CM. 3	0.49272
			CM. 1	0.01365
MAX.OIR Y			CM. 2	0.00091
			CM. 5	0.00000

CASE-2-1-1



MOOE NO 5	FREQUENCY	0.7048	CM. 3	0.48258
	PERIOO	1.419	CM. 4	0.48258
			CM. 1	0.03398
MAX.OIR Y			CM. 2	0.00085
			CM. 5	0.00001

図-4.6.3(2) 振動モード図

表-4.6.4(1),(2)に固有値解析の結果を示す。図-4.6.3(1),(2)に各解析ケースにおけるケーブルの1次振動の振動モード図を示す。表4.6.5にCASE1-1-1に着目した場合の各段のケーブルの1次振動の振動数を示す。表-4.6.6(1)~(3)に1段目~3段目のケーブルの1次振動に着目した解析結果を示す。サブスパン長 ℓ での振動数 f' は、連結材を中央につけたCASE2-1-1を除き、サブスパン長 ℓ と連結材設置前のケーブル長 L および振動数 f と概ね次の関係式が成り立つ。

$$f' = \frac{f \cdot L}{\ell}$$

これは、連結材を中央に付けた場合は、格段のケーブルが連成して振動しているためである。

表-4.6.5 各段ケーブル1次振動数 (CASE1-1-1)

	ケーブル長 (m)	1次の振動数(Hz)
1段目ケーブル	201.2	0.5204
2段目ケーブル	178.9	0.5861
3段目ケーブル	156.5	0.6703
4段目ケーブル	134.2	0.7807
5段目ケーブル	111.8	0.9334
6段目ケーブル	89.4	1.1747

表-4.6.6(1) 1 段目ケーブル 1 次振動

	1 段目ケーブル 長 L(m)	サブスパン長 l (m)	振 動 数 解析値(Hz)	$f' = \frac{f L}{l}$
CASE 1-1-1	201.2	—	f=0.5204	—
CASE 2-1-1	201.2	100.6	0.7048	1.0408
CASE 2-1-2	201.2	150.9	0.6499	0.6939
CASE 2-1-3	201.2	176.1	0.5739	0.5946

表-4.6.6(2) 2 段目ケーブル 1 次振動

	2 段目ケーブル 長 L(m)	サブスパン長 l (m)	振 動 数 解析値(Hz)	$f' = \frac{f L}{l}$
CASE 1-1-1	178.9	—	f=0.5861	—
CASE 2-1-1	178.9	89.5	0.7048	1.1722
CASE 2-1-2	178.9	134.2	0.7421	0.7813
CASE 2-1-3	178.9	156.5	0.6548	0.6700

表-4.6.6(3) 3 段目ケーブル 1 次振動

	3 段目ケーブル 長 L(m)	サブスパン長 l (m)	振 動 数 解析値(Hz)	$f' = \frac{f L}{l}$
CASE 1-1-1	156.5	—	f=0.6703	—
CASE 2-1-1	156.5	78.3	0.7048	1.0408
CASE 2-1-2	156.5	117.4	0.8450	0.8935
CASE 2-1-3	156.5	136.9	0.7526	0.7662

1 段目ケーブル 1 次振動に着目した等価質量および見かけの対数減衰率を求める。等価質量および対数減衰率は次式によって定義する。対数減衰率は S c 数の大きさを m が一定と考え評価する。

$$\text{等価質量} = \frac{\int_{\text{全構造}} m \phi^2 dx}{\int_{\text{全空気ケーブル}} \phi^2 dx}$$

$$\text{基準等価質量} = \frac{\int_{\text{全構造}} m \phi^2 dx}{\int_{\text{全構造}} \phi^2 dx} \quad (\text{無対策})$$

$$= 2.82$$

$$\delta' = \frac{m_{\text{等価質量}}}{m_{\text{基準等価質量}}} = \delta$$

表-4.6.7 に解析結果を示す。

表-4.6.7 等価質量および対数減衰率

	等 価 質 量	対数減衰率
CASE 1-1-1	5.63	0.020
CASE 2-1-1	4.67	0.016
CASE 2-1-2	6.68	0.024
CASE 2-1-3	5.87	0.022

CASE1-1-1 の無対策の等価質量および対数減衰率と比較した場合、連結材を中央に付けた場合を除いて対数減衰率、等価減衰とも増加していることがわかる。解析の結果、他段のケーブルの質量効果以外に、桁、塔の質量効果の影響を検討したが、ほとんど影響がないことがわかる。連結材を中央に付けた場合には基準等価質量よりの増加は確認できるが構造系全体としての増加量は少ないことがわかる。

連結材に発生する張力の評価

連結材に発生する張力については、図-4.6.4 に示すようなモデルを用いて、ケーブルに強制振動を与え、連結材に発生する張力について評価する。強制振動はサブスパン長 ℓ で 2 D の片振幅でとなる加振力で加振する。発生張力は、連結材取り付け位置 ℓ および連結材のバネを変化させ評価を行う。表-4.6.8 に解析対象ケーブルの諸元を示す。また表-4.6.9 に解析ケースを示す。

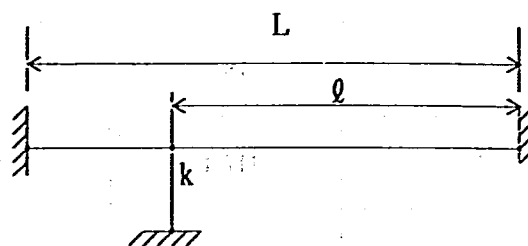


図-4.6.4 解析モデル図

表-4.6.8 ケーブル諸元

ケーブル径	D(mm)	187.0
ケーブル長	L(m)	200.0
ケーブル重量	W(kgf/m)	105.49
ケーブル張力	(tf)	1400.0
ケーブル断面積	(mm ²)	10,657
連結材部材長	(m)	2.0
連結材断面積 (mm ²) (連結材パネ定数 (tf/m)) (連結材径 (mm))		100.0 ~ 10,000.0 (1000.0 ~ 100,000.0) (約φ16 ~ 約φ50)
連結材張力	(tf)	1.0
ケーブル及び連結材の 対数減衰率		0.01

表-4.6.9 解析ケース

	連結材取付位置
CASE 1	1/10・L 位置
CASE 2	2/10・L 位置
CASE 3	3/10・L 位置
CASE 4	4/10・L 位置
CASE 5	5/10・L 位置

表-4.6.10(1)~表-4.6.10(3)に固有値解析結果を示す。表-4.6.11(1)~表-4.6.11(3)に連結材の発生軸力および応力を示す。

表-4.6.10(1) 固有振動特性 ($A=0.0001\text{m}^2$, 約 $\phi 16$)

	1 次		2 次	
	ω (rad/sec)	f (Hz)	ω (rad/sec)	f (Hz)
CASE 1	6.23001	0.99154	12.45157	1.98173
CASE 2	6.99539	1.11335	13.97476	2.22415
CASE 3	7.97762	1.26968	15.89563	2.52987
CASE 4	9.27886	1.47678	18.56298	2.95439
CASE 5	10.89071	1.73331	21.75896	3.46305

表-4.6.10(2) 固有振動特性 ($A=0.0005\text{m}^2$, 約 $\phi 36$)

	1 次		2 次	
	ω (rad/sec)	f (Hz)	ω (rad/sec)	f (Hz)
CASE 1	6.27937	0.99939	12.55112	1.99757
CASE 2	7.06180	1.12392	14.11261	2.24609
CASE 3	8.06703	1.28391	16.11629	2.56499
CASE 4	9.40572	1.49697	18.78729	2.99009
CASE 5	11.23284	1.78776	22.42353	3.56881

表-4.6.10(3) 固有振動特性 ($A=0.001\text{m}^2$, 約 $\phi 50$)

	1 次		2 次	
	ω (rad/sec)	f (Hz)	ω (rad/sec)	f (Hz)
CASE 1	6.28613	1.00047	12.56464	1.99972
CASE 2	7.07050	1.12531	14.13011	2.24888
CASE 3	8.07848	1.28573	16.14037	2.56882
CASE 4	9.42146	1.49947	18.81764	2.99492
CASE 5	11.27739	1.79485	22.51135	3.58279

表-4.6.11(1) 連結材軸力 ($A=0.0001\text{m}^2$, 約 $\phi 16$)

	連結材軸力 (tf)		連結材応力 (kgf/㎠)		破断強度 (tf)
	1 次	2 次	1 次	2 次	
CASE 1	8.25	16.64	82.5	166.4	約14.0
CASE 2	9.81	20.12	98.1	201.2	約14.0
CASE 3	11.42	27.36	114.2	273.6	約14.0
CASE 4	13.81	24.97	138.1	249.7	約14.0
CASE 5	31.26	61.49	312.6	614.9	約14.0

表-4.6.11(2) 連結材軸力 ($A=0.0005\text{m}^2$, 約 $\phi 36$)

	連結材軸力 (tf)		連結材応力 (kgf/㎠)		破断強度 (tf)
	1 次	2 次	1 次	2 次	
CASE 1	8.94	17.90	17.9	35.8	約68.0
CASE 2	10.12	20.38	20.2	40.8	約68.0
CASE 3	11.65	24.20	23.3	48.4	約68.0
CASE 4	13.70	26.72	27.4	53.4	約68.0
CASE 5	32.49	64.56	65.0	129.1	約68.0

表-4.6.11(3) 連結材軸力 ($A=0.001\text{m}^2$, 約 $\phi 50$)

	連結材軸力 (tf)		連結材応力 (kgf/㎠)		破断強度 (tf)
	1 次	2 次	1 次	2 次	
CASE 1	9.03	18.05	9.0	18.1	約135.0
CASE 2	10.24	20.42	10.2	20.4	約135.0
CASE 3	11.70	23.80	11.7	23.8	約135.0
CASE 4	13.69	27.13	13.7	27.1	約135.0
CASE 5	32.71	64.90	32.7	64.9	約135.0

発生する張力は、中央に連結材を設置したCASE 5 で非常に大きい張力が発生することがわかる。また、連結材の断面積を変化させても、発生軸力にはほとんど変化が見られないことがわかる。連結材を中央に設置することは、連結材に発生する張力および前述の連結材の効果の解析上からも有効でないことがわかる。

付録-1 第4, 5回中間報告会 質疑応答結果

中間報告の内容

研 究 項 目	担 当	第4回 94.11.9	第5回 95.7.28
1. ウェークギャロピングの特性予測に関する研究			
① ケーブル間距離と迎角の影響その1	三井造船	○	
② ケーブル間距離と迎角の影響その2	住友重機械	○	
③ タウトストリップの追加実験	N K K	○	
④ 偏角の影響	I H I	○	
2. 新しい構造力学的制振装置の開発に関する研究			
① 実大ケーブル振動実験結果と風洞実験計画	飛島、大林	○	
② 風洞実験結果と数値計算結果	大林、清水		○
③ スペーサー部高減衰ゴムによる付加減衰効果の検討	川崎重工	○	
3. 空力学的制振手法の開発に関する研究			
① 空力的制振手法の開発に関する研究	住友重機械		○
4. 数値解析による制振効果の評価に関する研究	長 大	○	○

1. 発表テーマ	第4回中間報告会 ケーブル間隔と迎角の影響（その1）
2. 発表者	三井造船株式会社 林 健一
3. 討議内容	Q. 1 非定常空気力の速度比例成分はどうだったか？ A. 1 非定常空気力の測定は2回に分けて実施した。この時、非定常空気力の大きさについては再現性があったが、変位との位相差については、まったく異なる結果が得られた。現在、この原因について検討中であり、コメントできない。

1. 発表テーマ	第4回中間報告会 ケーブル間隔とその迎角の影響 (その2)
2. 発表者	住友重機械工業株式会社 鹿島主央
3. 討議内容	Q. 1 振動・振幅関係図 (V-A図) の○、△、▽マークは何を示しているのか？ A. 1 ○、△、▽は、それぞれ平均振幅、最大振幅、最小振幅を示している。 コメント；上流側、下流側ケーブルに主流直角方向へ1自由度を与えた場合、下流側ケーブルの応答は、タウトストリップ試験のそれと類似している。

1. 発表テーマ	第5回中間報告会 ケーブル間隔と迎角の影響・（その2）および 空力学制振手法の開発に関する研究
2. 発表者	住友重機械工業株式会社 鹿島主央
3. 討議内容 Q. 1 ノーマルケーブルの$(Sh, Sv) = (4D, 0)$の応答は、50φと100φではだいぶ異なっている。これは、アスペクト比が違うためではないか？ A. 1 アスペクト比の影響もあると思われるが、50φ、100φどちらの場合も閉塞率は5%以下であり、主にレイノルズ数の影響だと考えている。 Q. 2 ケーブルは、どのような応答を示したか？ A. 2 ストライプケーブルでは、ケーブル間隔が比較的大きな場合には、下流側ケーブルのみに不安定振動が発生したが、$(Sh, Sv) = (3.5D, 0)$からケーブル間隔が小さい時には、一部の風速域で下流側ケーブルとともに上流側ケーブルにも不安定振動が発生した。ノーマルケーブルの場合、今回実施した試験ケースでは、下流側ケーブルのみ振動し、上流側ケーブルには不安定振動は発生しなかった。	

1. 発表テーマ	第4回中間報告会 C I グループ：実大ケーブル振動実験報告と風洞実験計画
2. 発表者	飛島建設(株) 岡本 浩（実大ケーブル振動実験報告） (株)大林組 野村 敏男（風洞実験計画）
3. 討議内容	Q. 1 対数減衰率の定義はどのように行ったか？ A. 1 両ケーブルの振動径の逆位相成分について行った。

1. 発表テーマ	第5回中間報告会 C I グループ：風洞実験結果と数値計算結果
2. 発表者	(株)大林組 野村 敏男（風洞実験結果） 清水建設(株) 大野 浩（数値計算結果）
3. 討議内容	Q. 1 風洞実験で用いた「せん断型スパーサ」は、実大ケーブルで使用したスパーサと同じ減衰機構を有しているか？ A. 1 風洞実験上の制約から、機構は異なるが、その減衰特性は同じになるように設定しており、特に問題はないと考えられる。 Q. 2 減衰機能付きスパーサの、付加し得る最大の対数減衰率はいかほどか？ A. 2 数値計算上は、かなり大きい数値が可能であるが、ケーブルのねじり剛性に大きく依存することや、大きな減衰を実現するバネ定数と減衰係数の組み合わせを可能とする減衰材料の存在の有無等、現状では確定できない要素が多く、明言できない。

1. 発表テーマ	第4回中間報告会 スペーサ部高減衰ゴムによる付加減衰効果の検討
2. 発表者	川崎重工業株式会社 小川 一志
3. 討議内容	Q. 1 スペーサ部高減衰ゴムによる付加減衰効果を検討している振動モードは、2本ケーブルが逆位相で振動する対称1次振動モードか？ A. 1 そのとおりである。 Q. 2 他の振動モードに対するスペーサ部高減衰ゴムの付加減衰効果はどうか？ A. 2 作動原理から考えて、スペーサ部高減衰ゴムは、2本ケーブルが同位相で振動するモードには効かない。逆位相で振動する高次の振動モードに対しては、スペーサがモードの節に位置しなければ、ある程度効くものと推定される。

付録-2 発表論文一覧表

No	発 表 者	論 文 名	発表学協会・論文名	年 月
1	鹿 島 竹田哲夫 土 研 佐藤弘史 他	ウェークギャロッピングに対する 減衰付加の制振対策	第48回土木学会年次学術 講演会	1993.9
2	NKK 藤澤伸光	並列ケーブルのウェークギャロッピング に関するタウトストリップ実験	第49回土木学会年次学術 講演会	1994.9
3	三井造 林 健一 内藤誠他 他	並列ケーブル振動時における 振幅依存特性について	第49回土木学会年次学術 講演会	1994.9
4	三菱重 斎藤 通 本田昭弘 他	斜張橋並列ケーブルのウェーク ギャロッピング振動について	第49回土木学会年次学術 講演会	1994.9
5	川崎重 小川一志 野上千秋	並列ケーブルの振動特性に 及ぼすスパーサの効果	第49回土木学会年次学術 講演会	1994.9
6	住友重 鹿島主央 宮崎正男 他	斜張橋並列ケーブルの 空力制振対策	第49回土木学会年次学術 講演会	1994.9
7	住友建 松元香保里 中井祐司 他	並列ケーブルの減衰スポンサー に関する研究	第49回土木学会年次学術 講演会	1994.9
8	鹿 島 向 弘晴 土 研 佐藤弘史 他	ケーブル間隔の拡張による ウェークギャロッピングの制振効果	第49回土木学会年次学術 講演会	1994.9
9	大林組 樋口俊一 野村敏男	ウェークギャロッピングに対する構造的 制振対策-スパーサの基本的検討	第49回土木学会年次学術 講演会	1994.9
10	鹿 島 佐野演秀 竹田哲夫 他	実橋観測に基づいたウェーク ギャロッピングの振動特性について	第49回土木学会年次学術 講演会	1994.9
11	NKK 藤澤伸光	並列ケーブルのウェーク ギャロッピングに関する一実験	第13回風工学 シンポジウム	1994
12	三井造 林 健一 赤瀬雅之 他	並列ケーブル振動時における 振動依存特性について	第13回風工学 シンポジウム	1994

13	住友重 鹿島主央 宮崎正男 他	斜張橋並列ケーブルのウェーク ギャロッピングと空力制振対策	第50回土木学会年次学術 講演会	1995.9
14	ピーエス 久保明英 河村哲男 他	斜張橋並列ケーブル耐風制振用 ねじれ減衰スペーサー	第50回土木学会年次学術 講演会	1995.9
15	大林組 野村敏男 他 住友建 松元香保里	並列ケーブルのウェークギャロッ ピングに対する構造的制振対策	第50回土木学会年次学術 講演会	1995.9
16	住友建 松元香保里 中村収志 他	並列ケーブル減衰スペーサー に関する研究（その2）	第50回土木学会年次学術 講演会	1995.9
17	大林組 藤原章博 樋口俊一 他	並列ケーブルのウェークギャロッピング に対する構造的制振対策-実大ケーブル実験	第50回土木学会年次学術 講演会	1995.9
18	住友建 中村収志 清水建 大野 浩 他 飛島建 武藤正人	斜張橋並列ケーブルにおける 新しい制振手法の研究	プロストレスコンクリー トの発展に関するシンポ ジウム論文集	1995.10
19	住友重 鹿島主央	斜張橋並列ケーブルのウェークギャロッ ピングとその空力制振対策について	平成7年度非定常空気力 懇談会 構造物空気力研	1995
20	住友重 宮崎正男 鹿島主央	斜張橋並列ケーブルのウェークギャロッ ピングとその空力制振対策について	日本風工学会誌 No63	1995.4

付録－3 出願特許一覧

No	出 願 人	発 明 名 称	出願年月
1	土研及び共同研究16社 (川崎重工、ピーエス)	斜張橋における並列ケーブルの制振方法 及び装置	1994.7
2	土研及び共同研究16社 (清水建、大林組、住友 建、飛島建、ピーエス)	並列ケーブルの制振方法および装置	1994.7

() 内の会社は直接関与会社

斜張橋並列ケーブル耐風制振に
関する共同研究報告書(その3)

共同研究報告書
第133号平成7年9月

建設省土木研究所構造研究室

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の平成5年度の成果を報告するものである。本年度はウェークギャロッピングの特性を明らかにするための研究および新しい制振装置の開発とその効果に関する基礎的な実験が実施された。前者に関しては、新しく実施された多くの風洞実験結果を示し、ウェークギャロッピングの発現状況を考察した。本研究によってウェークギャロッピングの性状とケーブル間隔の関係、構造減衰および気流の乱れ等との関係が明らかになった。後者に関しては、主に減衰付加型スパーサおよび空力的対策に関し、実験および解析による効果の検討の成果をとりまとめた。

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

郵便はがき

いは50
円切
下手を

305-□□

建設省土木研究所

構造橋梁部構造研究室 御中

茨城県つくば市大字旭一番地

No. 3

No. 3

配布先氏名

配布先住所



共同研究報告書第 133 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属(住所)

氏 名

印