

土木研究所資料

羽地ダム湖水橋のケーブル制振に関する 実験報告書

平成元年2月

建設省土木研究所
構造橋梁部構造研究室

Copyright © (1989) 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。

羽地ダム湖水橋のケーブル制振に関する 実験報告書

構造研究室 室長 横山 功一

研究員 日下部 毅 明

伊 関 英 彦

要 旨

沖縄県名護市に建設が予定されている2径間PC斜張橋羽地ダム湖水橋の風によるケーブルの振動に関連し、ケーブルの相互連結や各種ダンパー等のケーブル制振装置の基礎的な検討を行った。その結果ケーブルの連結に関しては、その制振効果には構造減衰だけでは評価できない様々な要因があり、検討を深める必要があること、ダンパーの効果についてはレインバイブレーションに十分な効果があるものの、数値計算や実験によってダンパーの性能および設置方法を最適にする必要性が大きいことが明らかとなった。

キーワード：PC斜張橋，レインバイブレーション，ケーブル相互連結，加振実験，ダンパー

ま え が き

羽地ダム湖水橋は沖縄県名護市に建設が予定されている2径間PC斜張橋(109.0+89.0m)である。斜張橋のケーブルは最近になって顕著な振動事例の報告が急増しており問題となっているため、羽地ダム湖水橋に関しても振動が発現した場合に備え、制振方法を検討する必要があると考えられた。そこで昭和63年度土木研究所では模型実験によってケーブルの制振対策の効果を計測し、今後の羽地ダム湖水橋のケーブル制振装置の検討のための基礎的な検討を行うこととした。

検討する制振方法としては、現在まで実橋で実績のある構造力学的な制振方法を選び、特に多くの橋梁で採用されたケーブルの連結効果を明らかにする事に重点を置いた。また、オイルダンパーやストックブリッジダンパー等の制振装置の効果や、桁の特性の影響についても調査し、ケーブルの制振方法を検討する際に考慮すべき事を考察した。

目 次

1. 概 要	1
1.1 羽地ダム湖水橋における実験の必要性について	1
1.2 検討する制振工	1
2. 模型実験	2
2.1 実験の概要	2
2.2 模 型	2
2.3 実験方法	2
2.4 実験ケース	2
2.5 実験結果	3
2.6 考 察	3
3. 制振方法の基礎的検討	37
3.1 羽地ダム湖水橋で検討すべき振動現象	37
3.2 レインパイプレーションの特性	37
3.3 制振対策	37
4. ま と め	39
謝 辞	39
参考文献	39

1. 概 要

1.1 羽地ダム湖水橋における実験の必要性について

羽地ダム湖水橋は沖縄県名護市に建設が予定されている2径間PC斜張橋(109.0+89.0m)である。斜張橋のケーブルは最近になって風による顕著な振動が発現して問題となっているが、羽地ダム湖水橋に関しても振動が発現するか否かの判断は難しい所が多い。

斜張橋におけるケーブルは、斜張橋全体系を成立させるための主要な部材である。したがってケーブルの振動は斜張橋の安全性に問題を投げかける。さらにケーブルの振動は仮に安全性においては問題とならないものであったとしても、一般利用者に不安感を与えることは十分に問題意識を持つべき現象と言える。したがってケーブルの有効な制振対策の開発は緊急の重要な課題である。このため、土木研究所では模型実験によってケーブルの制振対策の効果を計測し、今後の羽地ダム湖水橋のケーブル制振装置の検討のための基礎的な調査とした。

1.2 検討する制振工

ケーブルの振動が問題となった橋梁の制振対策としては、名港西大橋、櫃石島・岩黒島橋そして呼子大橋ではワイヤーによるケーブルの連結によって、また荒津大橋では桁とケーブルをダンパーを通じて連結する方法が実施されており、それぞれ有効性が振動実験や実橋観測によって確かめられている。

制振対策としては、構造力学的対策と空気力学的が考えられるが、ここでは実績のあるケーブルの相互連結やダンパーといった構造力学的な制振方法に関して検討し、空気力学的な制振方法に関しては他の研究の結果を見て、その適用性について考察を加えることとした。

2. 模 型 実 験

2.1 実験の概要

斜張橋のケーブルの振動の効果的な制振方法を調査するために、構造的な諸元を羽地ダム湖水橋に相似させた弾性模型による振動実験を実施した。模型はケーブル振動に与える桁の構造特性の影響を考慮できるものとし、ケーブルの制振方法としては、ケーブルの相互連結と、様々なダンパーを対象とした。ただし、ダンピングの相似に関しては調整が困難であり、今回の検討は構造減衰の定量的な評価ではなく、効果に関する特徴を捉えることを目的としたため、実験によって得られた構造減衰は絶対的ではなく相対的に意味を有する。

2.2 模 型

使用した模型は基本的には羽地ダム湖水橋の1/40の縮尺を有するものである。ただし今回の実験はケーブルの振動特性に重点を置いているため、調整の困難であったタワー重量に関しては無視し、桁の重量に関しても厳密な調整は行っていない。また、模型は橋軸面外のあらゆる変形を考慮しない2次元平面模型である。ケーブルは伸び剛性をコイルバネによって、また重量は10cm間隔に設置した重錘によって相似させた。また張力は実橋の振動数に合わせることで相似しているものと見なした。表-1に模型諸元を、また図-1および写真-1に模型を示す。

2.3 実験方法

実験は固有振動モードの計測と過渡振動の計測よりなり、加振は電磁加振機によった。自由減衰を見る場合は、振動モードが加振機の影響でゆがむことを避けるために、加振機を力学的に模型より切り離す予定であったが、この方法によると、切り離し時に加振振動数に関わらずケーブルの1次振動が発生した。そこで加振機を取り付けたまま加振力の供給を切り減衰を測定することとした。

過渡応答特性の測定の1過程は加振開始時から定常状態に至るまでの過渡応答および定常状態の1分間、さらに自由減衰の開始から終了までを記録することとした。記録にはペン書きオシログラフおよびデータレコードを用いた。変位の測定は着目径間の上から2段のケーブル(着目ケーブル)以外の2点は加速度計を、着目ケーブル2段に関しては、ケーブルに取り付けられたそれぞれ1つずつの光源をターゲットとして光学式変位計で測定した。図-2に実験の概念図を示す。

2.4 実験ケース

実験ケースは表-2に示す25ケースを行った。これらの実験ケースはケーブルの連結の効果を見る実験ケース(2~11)、オイルダンパーや動吸振器のような構造力学的制振装置の影響を見るケース(12~21)、そして着目支間のケーブル以外がケーブルの振動におよぼす効果を見る実験(22~25)に大別される。実験の目的をより明らかとするために、主な実験ケース間の関係を図-3に示す。ここで基本模型a~dと

はその概要を図-4に、また主な制振装置は図-5に示すものである。連結部材として用いた釣糸の剛性は一本当りの伸び剛性EAが22kgfであり、これは実橋においては1408tfとなり、 $\phi 9$ mmの鋼線に相当する。また2本の釣糸を用いた場合は、 $\phi 13$ mmの鋼線に相当し、名港西大橋で用いられた $\phi 14$ mmのワイヤーロープに近い剛度に相当する。最後に各ケースの内容がより明確となるように、図-6に全ケースの模型の状況を簡単に示す。

なお以下の記述において、ケーブル連結位置aとはタワーからケーブル長 l の0.4倍の位置、連結位置bとは0.5 l 、そして連結位置cとは0.814 l の位置である。位置aおよびcは図-7に示すように、弦の振動モードを考慮した場合に、1次から4次までの振動モードについて効果のあると考えられる位置である。実験ではこの連結位置の外に2次モードに対して効果が小さいと考えられる $l/2$ の位置の連結も行い、連結位置の効果を調べた。

2.5 実験結果

図-8に全ケーブルの振動数を示す。また、全実験ケースに関する構造減衰を表-3にまとめる。表-3の加振対象とは加振機によって加振力を与えたケーブルあるいは桁である。実験は静止した状態から加振し、定常状態の1分間を記録した後に、加振力を切り自由減衰を読んだが、表中の強制加振時の負減衰とは加振による振動の発達を負減衰として捉え、対数減衰率として評価したものである。ここで構造減衰は加振時および自由減衰時ともに1mmの振幅を中心として計算することを原則とした。表には減衰の計算に使用した振幅の範囲が示されている。さらに図-9に基本模型a~dのモード図を示す。モード計測においては、ケーブルが桁と無関係に振動する振動モード3種類と桁を加振することによりケーブルが振動するモード1つを選んだ。モード図中の基準点とはモード図を作成するために加速度の比をとる時の基準とした点であり、物理的な意味はない。また連結点とは、ケーブルを連結した点である。また図中には後に実験結果の考察に用いるための分類であるS1-1、S2-1などの番号を付けてある。

2.6 考 察

以下に制振装置の効果を考察する。

2.6.1 連結の効果

(1) 連結の構造減衰への効果について

連結したケースの構造減衰の変化を図-10にまとめる。連結後の振動は連結点が振動の節となり、連結点と桁あるいはタワーの定着点の間(サブスパン)が一本のケーブルのような挙動を示すものと、連結点が振動の節とはならずほぼ腹のような挙動を示す振動に大別される。図-9のモード図を見てわかるように、連結後の固有振動形状は、一つのケーブルのサブスパンが大きく振動するものが多く、その振動数は、そのサブスパンと同じ長さのケーブルが独立時に有する固有振動数に近い。図-10において、振動の形態を分類するために、S1-1、S2-1等の符号をつけた。これはS1ケーブル(後者ではS2ケーブル)のサブスパンの1次の固有振動が全体で支配的となっている振動であることを意味している。

まず基本模型a~dに関してまとめた図-10.1を見る。全体的にみて構造減衰はS1ケーブル本来の1

次モードの構造減衰（図中○印）と比べ増加したり減少したりしており、明確な傾向は捉えられない。図中では、連結後のケーブルに関して一般的に最低次モードとなると考えられる、S1ケーブルのサブスパンの振動が際だつ固有振動モードについてS1-1の記号を付したが、1/2で連結したケース（No8）を除くと、減衰に変化がないと見たほうがよい。例外的に構造減衰の高まった1/2で連結したケースに関しては、最も構造減衰が増加しない連結方法と予想していたケースであり原因は不明である。

次に連結部材の剛度の影響（連結部材の粘性の影響が混入している可能性は大きく、純粋に剛度の影響とは言えない）を示した図-10.2, 3では、S1-1に関して構造減衰のかなりの増加が見られる。このことは、連結部材が伸縮性を持つことによって、ダンパーとして働く可能性を示唆するが、図-10.3のS2-1およびS3-1の減衰は逆に減少しており、この現象の説明のためにはさらに検討が必要と考えられる。この際、連結方法によって着目ケーブル以外のケーブルの挙動も微妙に変化するため、この現象の説明のためにはケーブル段数の少ないモデルを用いた方がよいと考えられる。

最後に連結段数の違いによる減衰の変化を図-10.4に示す。図中の▲および■は、連結点ごとケーブルが振動するため、構造減衰が付加されるメカニズムはS1-1とはやや異なると考えられる。なおS1-1に関しては、ここでも連結段数と減衰の変化を対応付けることは困難である。

以上見たように、今回の実験では構造減衰の増減に関して何等かの規則づけを行うことは全くできなかった。しかし連結部材の定着部の構造あるいは連結部材の材料的特性が影響を与える可能性は大きい。実橋では連結によってかなり大きな付加減衰が認められており、今回の剛な連結で減衰があまり向上しなかったことを考慮すると、連結部材の伸縮によって振動エネルギーが消費されることが有力な可能性として残される。したがって、今後は連結部材の材料の性質や定着点の条件に関して十分に制御できるような実験を行うことが重要と考えられる。

(2) 連結による振幅の変化に関して

ケーブルを相互連結したケースの定常振幅と連結前の定常振幅（図中○印）を図-11に比較する。加振エネルギーは、振動数によって変化することも考えられるので、図では実験ケース1の1次振動と2次振動に関して振幅を示し、これを直線で補間した値との比較を行っている。まず(a)では、位置c（図中▽）のような端部における連結はほとんど振幅を下げる効果がないことがわかる。また1/2点で連結した場合（図中□）全てのケーブルが本来この点を腹として振動できるため、1次振動（9.5 Hz、図中■）ではあまり振幅は下らない。また2次（11.75 Hz）の振動は、S1ケーブル無連結時の2次振動とほぼ同じであるが、振幅は半減している。これは図-10.1で示したように、この振動の減衰がかなり大きかったことに起因するものと考えられる。次の(b)の連結段数の影響は連結段数が多いほど振幅が小さくなることを示している。特に連結段数が少なくなると、連結されたケーブル全体が無連結次の1次振動の形状で振動するモードが現れるため、振幅の低減効果が小さくなる。(c)および(d)では、剛度の影響を見たが、その影響はないと見て良い。

(3) 他のケーブルに加わる加振力の伝達に関して

図-12に他のケーブルの振動の伝達の線形性について示す。横軸は加振力 p_1 をS1ケーブルに、加振力 p_2 をS1以外のケーブルにそれぞれ単独に加えた時のS1ケーブルの振幅の和であり、縦軸は p_1 、 p_2 を

同時に加えた時の振幅である。平均振幅は 45° 線よりやや下にあるが、安全側の評価をすれば、ほぼ線形性があると見なしても良いと考えられる。このことは単一加振力に関してはケーブルの振幅は減少するが、それぞれのケーブルに個別になんらかの加振力が働いたときに、総和として振幅はそれほど減少しない可能性があることを意味する。

(4) ケーブル連結による振動数への影響

図-10.1において○→▽→△→■の順に追うと連結がケーブルの中央に寄るほど、また図-10.4において×→■→▲→○の順に追うと連結段数が増えるほど、最低次の振動数は向上することがわかる。また、図-10.1において、実験ケース1におけるS1ケーブルの1次振動数と2次振動数の間には、同一記号（連結位置が同じであることを意味する）の固有振動が2点あるいは3点プロットされている。したがって連結によって、 n 次モードと $n+1$ 次モードの振動数が近接するのも特徴といえる。

2.6.2 他の制振装置の効果に関して

実験ケース12, 13の硬い中間支点、実験ケース14の強すぎるオイルダンパーそして定着部に巻かれたゴムなどは構造減衰の向上に全く効果がなかった。これはダンパーがケーブルの振動に応じて振動しないため、その設置点が節となるような振動が発生したためである。以下に効果のあった弱いオイルダンパーとストックブリッジダンパーの効果を示す。

(1) オイルダンパーの位置の効果

図-13にオイルダンパーの位置の効果を示す。オイルダンパーは設置点が高くなるほど効果があり、ケーブル端部に設置する限り、位置の効果は高次モードほど顕著であることがわかる。一方、オイルダンパーと同様の効果はスポンジを用いた中間支点でも得られた。表-4に同じ1/16点の位置での構造減衰率を比較する。スポンジを用いた場合、1次振動の構造減衰が最も大きく、高次ほど構造減衰が小さい。これはオイルダンパーの傾向と逆転している。別途行われた数値計算によると、ダンパーの粘性がある一定値を超えると粘性が増すほど減衰が小さくなり、ダンパーの設置位置が節となる振動が次第に顕著となったが、ここでも高次モードに関して同様の効果があったと考えられる。

(2) スtockブリッジダンパーの効果

図-14にストックブリッジダンパーの効果を示す。ここにストックブリッジダンパーはケーブルの1次の振動数のみに共振するように調整した。ストックブリッジダンパーは設置位置がモードの腹に近づくほど効果があり、また共振しない振動モードには全く効果がないことがわかる。

2.6.3 ケーブル以外の部材の影響

(1) 桁の影響

実験25は桁の構造減衰を上げたものである。比較が容易となるように、表-5に実験ケースNo1とNo25を比較する。桁の構造減衰が向上しても、ケーブルの独立モードの構造減衰は殆ど変化しない。これに対して、図-9.1の(a)に示した桁加振によりケーブルが振動するモードでは、桁の構造減衰と同じ減衰率で振動が治まることがわかる。したがって、ケーブルの振動においては、検討の対象となっているケーブルと桁の振動数が接近している場合には、ケーブルの振動が生じないことも有り得る。

(2) 他の径間のケーブルの影響

今回の実験の殆どは着目ケーブルと反対側の径間のケーブルを拘束したが、ケースNo22ではこれを自由にした。加振および減衰は同じ条件で行ったが、波形及び振幅共に特別な変化はなかった。したがって、振動数の近接した部材が複数あっても必ずしも共振を起こしかつうなりを起こすとは限らない。

表-1 模 型 諸 元

	実 橋 値	縮 尺	模型所要値
基本的物理量			
長 さ (m)	—	1/n	—
重 量 (kg/m)		1/n ²	
最長ケーブル			
長 さ (m)	108.4	1/n	2.71
伸び剛性 (tf)	102640	1/n ³	1603.8
重 量 (kgf/m)	67.9	1/n ²	0.042
張 力 (kgf)	274.8	1/n ³	4.92
桁			
支 間 (m)	109	1/n	2.725
重 量 (kgf/m)	19324	1/n ²	12.08
曲げ剛性 (kgf·cd)	1.052×10^{14}	1/n ⁵	1027441
タワー			
高 さ (m)	46.5	1/n	1.16
曲げ剛性 (kgf·cd)	8.533×10^{13}	1/n ⁵	833301

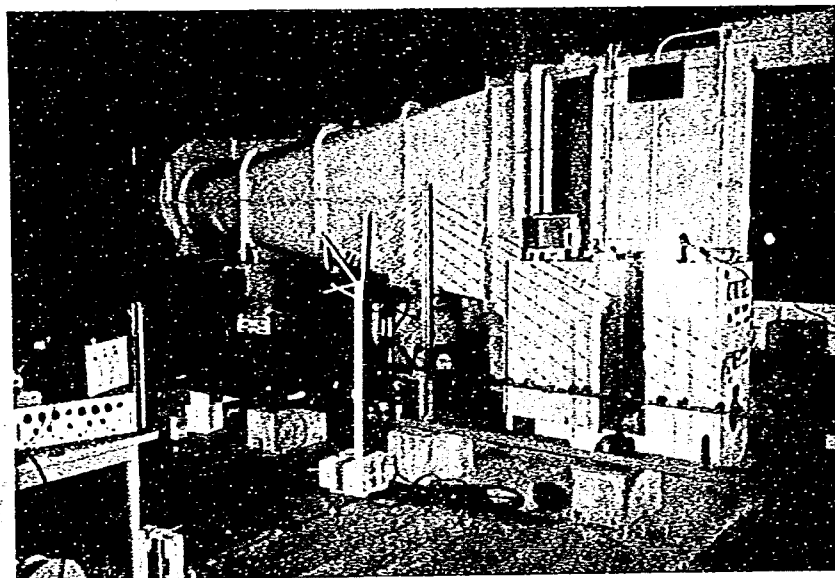
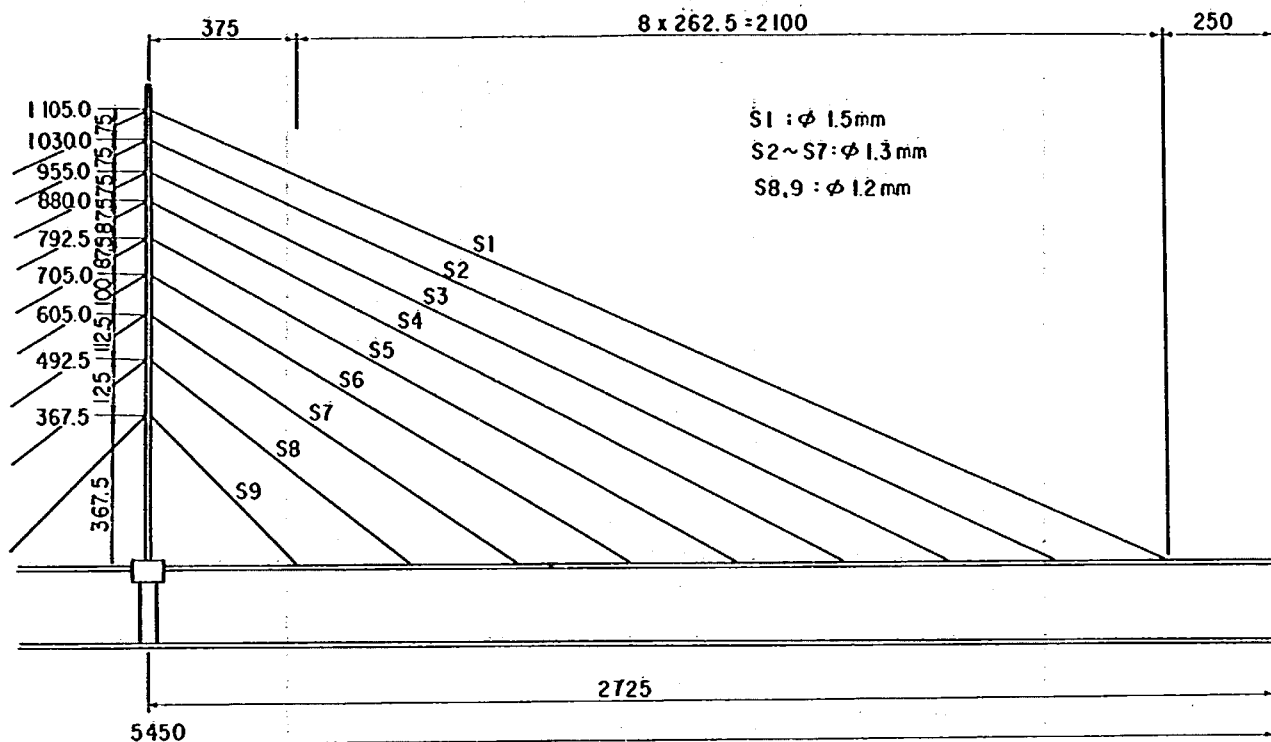
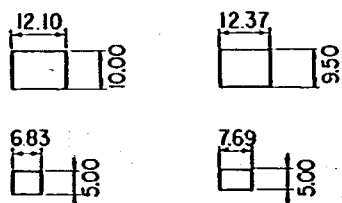


写真-1

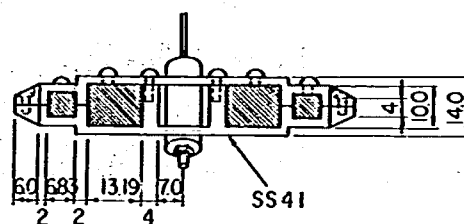
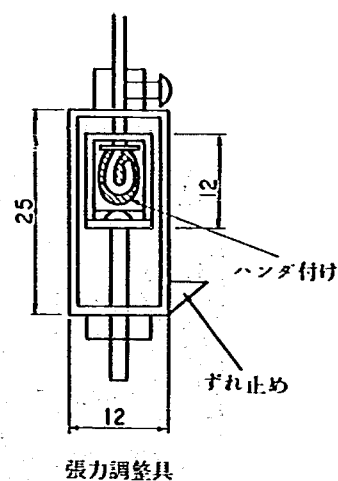


(1) 全体図

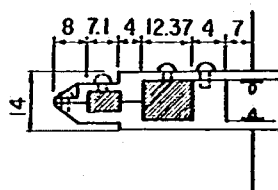


耐性棒 (断面図) タワー耐性棒 (断面図)

(2) 耐性棒



(3) 桁側ケーブル定着部



(4) 塔側ケーブル定着部

図-1 模 型 図

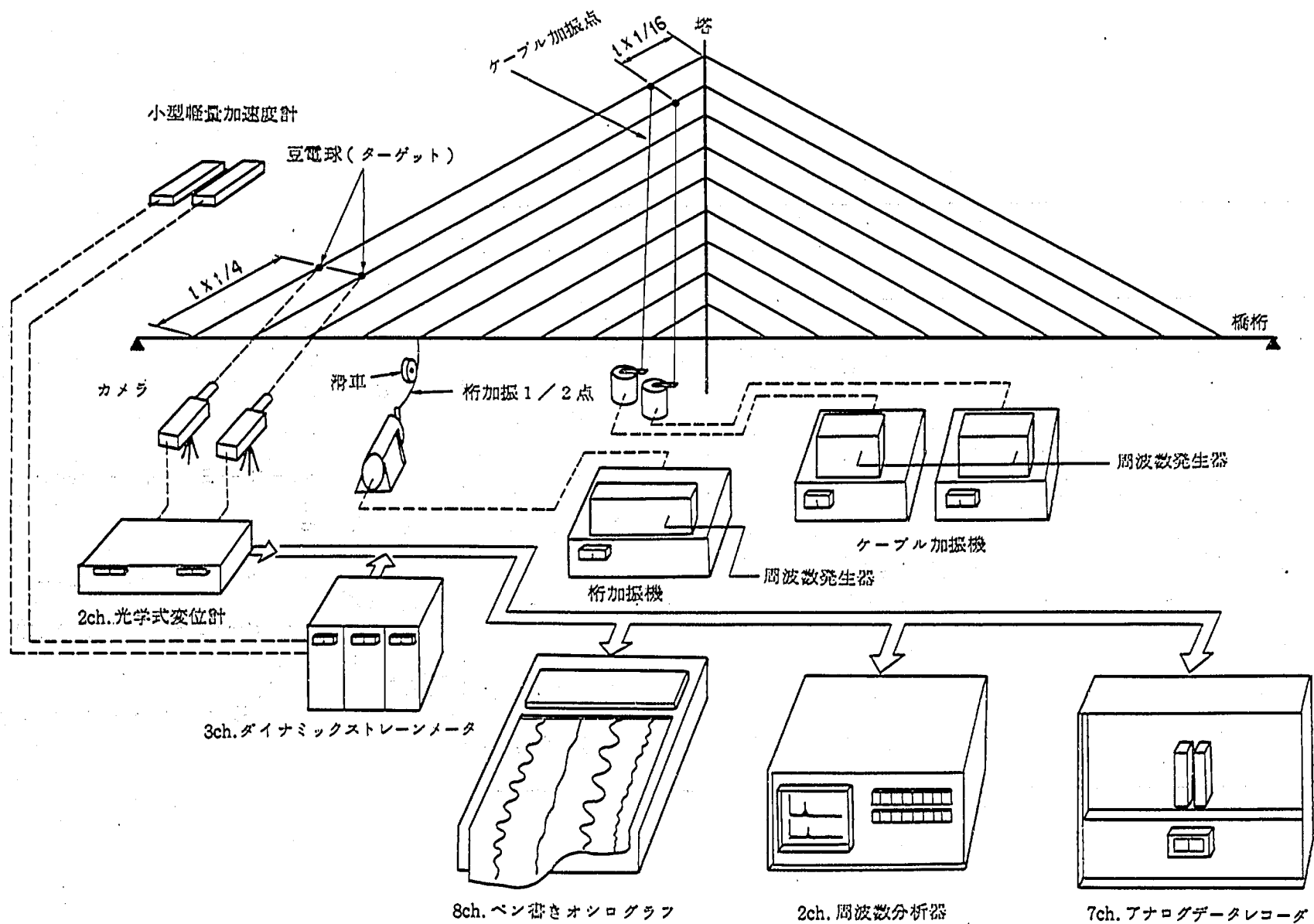


図-2 実験の概略

表-2 実験ケース

実験 No	基本模型	模 型 詳 細	加振種類
1	a	基 本	4
2	b	基 本	5
3		連結段数3段	6
4		連結段数5段	6
5		輪ゴムを用いた連結	4
6		釣り糸2本を用いた連結	4
7		S1～S3の振動数を一致	3
8	c	基 本	6
9	d	基 本	7
10		釣り糸一本による連結	3
11		釣り糸二本による連結	3
12	a	ケーブル中間支点 (2/32点)	3
13		ケーブル中間支点 (3/32点)	3
14		強いオイルダンパー (3/32点)	4
15		弱いオイルダンパー (3/32点)	3
16		弱いオイルダンパー (2/32点)	3
17		弱いオイルダンパー (1/32点)	3
18		定着部に円筒ゴム設置	3
19		中間スポンジ支点 (2/32点)	3
20		ストックブリッジダンパ1/4点	3
21		ストックブリッジダンパ1/8点	3
22		右側ケーブルの拘束解除	3
23		桁重量を軽減	2
24		桁に中間橋脚を設置	3
25		桁にダンパーを設置	4

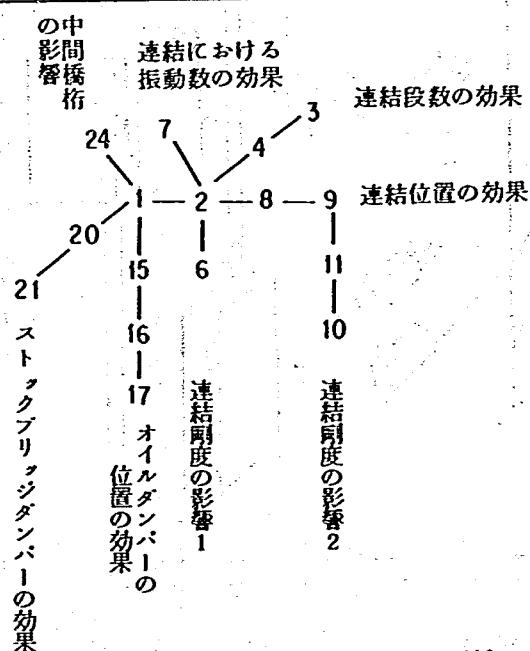
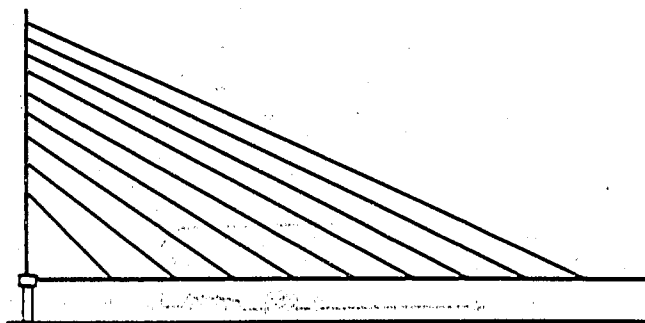
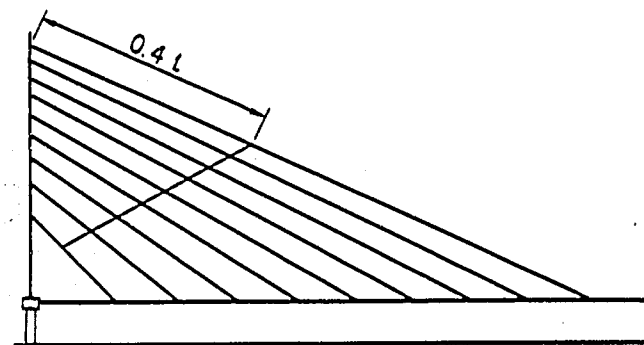


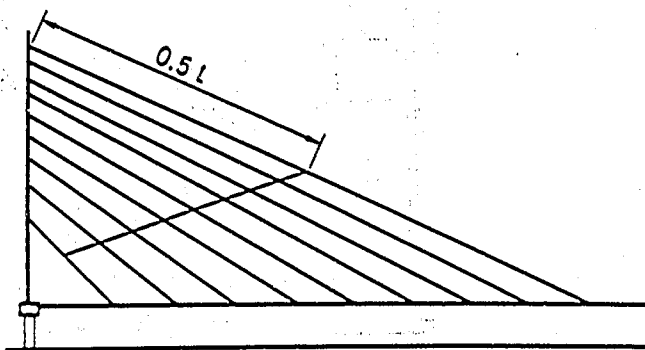
図-3 主要な実験ケースの関係



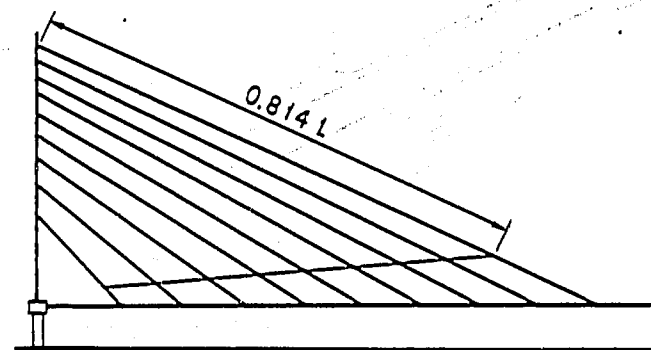
(a) 基本模型 a



(b) 基本模型 b

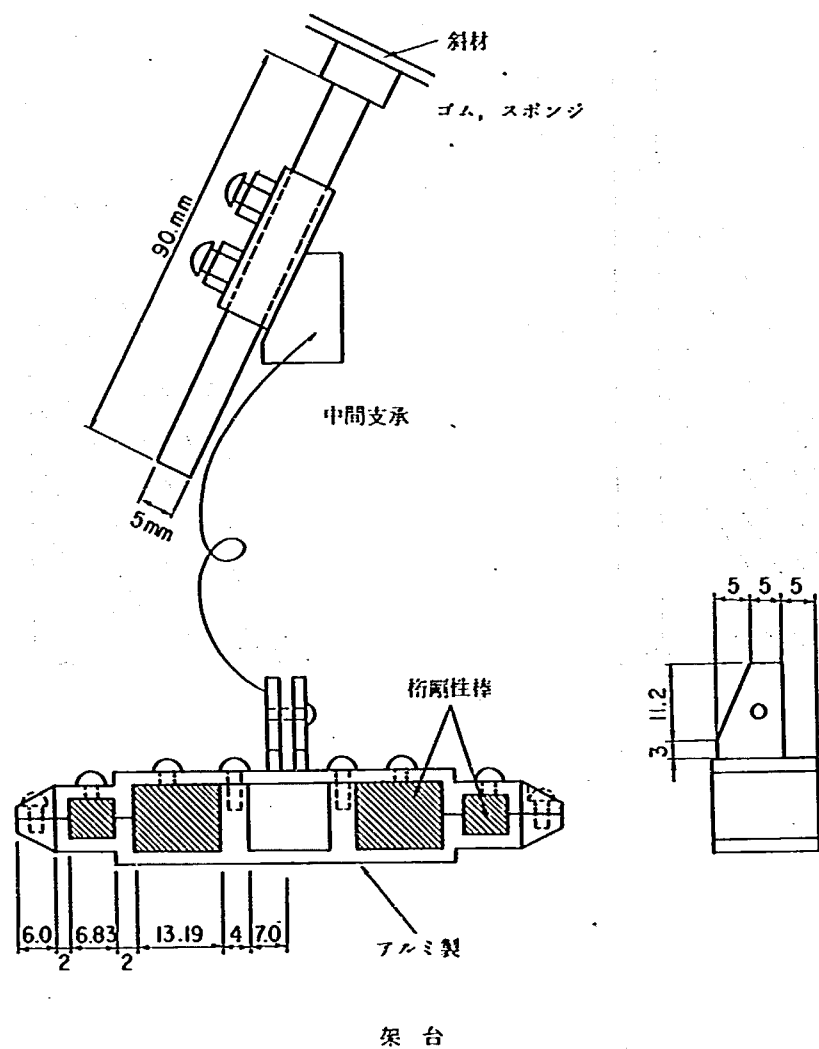


(c) 基本模型 c

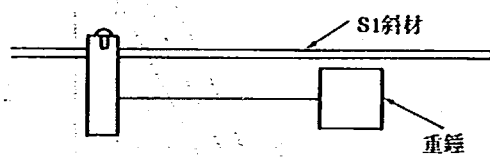


(d) 基本模型 d

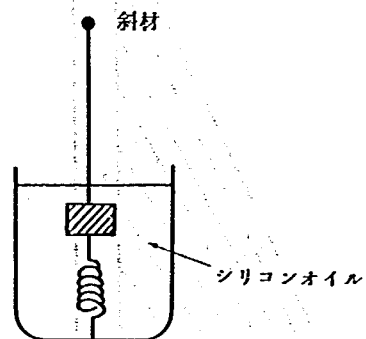
图-4 基本模型



(a) 中間支承とその架台



(b) ストックブリッジダンパ



(c) オイルダンパー

図-5 主な制振装置

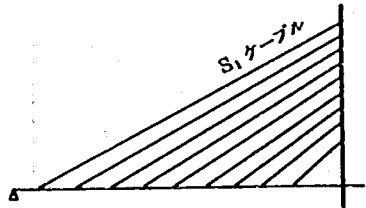
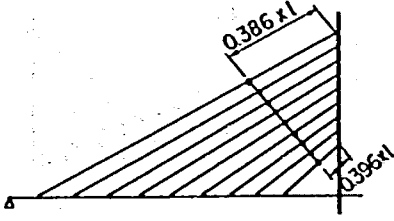
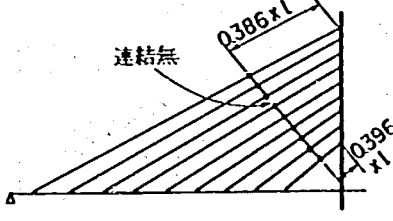
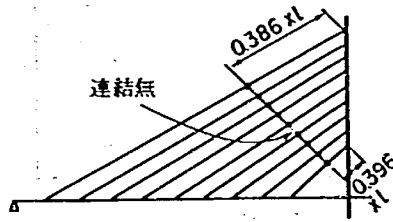
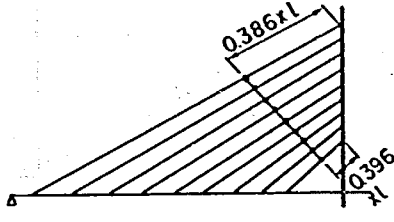
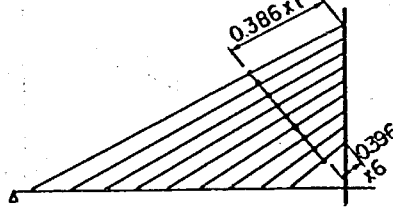
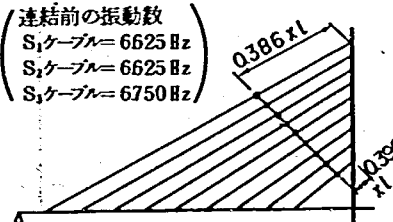
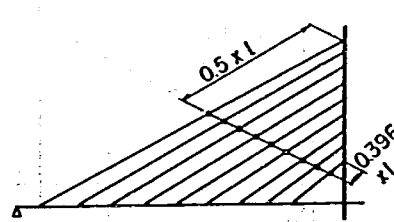
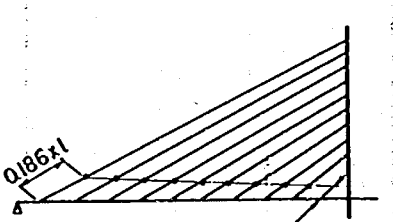
実験番号 1	実験番号 2	実験番号 3
基本模型 (制振対策無)  模型 a	全段連結 (剛)  模型 a'	1. S1, S2, S3 ケーブル連結 (剛) 2. S4, S5, S6, S7, S8, S9 ケーブル連結 (剛)  模型 a'
実験番号 4	実験番号 5	実験番号 6
1. S1, S2, S3, S4, S5 ケーブル連結 (剛) 2. S6, S7, S8, S9 ケーブル連結 (剛)  模型 a'	全段連結 (軟) (注意) 普通ゴム (2重) 使用  模型 a'	全段連結 (注意) 釣り系 (0.3φmm) 2本使用 釣り系強度 (EA) = 44kgf  模型 a'
実験番号 7	実験番号 8	実験番号 9
全段連結 (剛) (注意) S1, S2, S3 ケーブル振動数を一致する (連結前の振動数) S1ケーブル = 6625 Hz S2ケーブル = 6625 Hz S3ケーブル = 6750 Hz 	全段連結 (剛)  模型 b	全段連結 (剛)  模型 b'

図-6.1 実験ケースの図解 (その1)

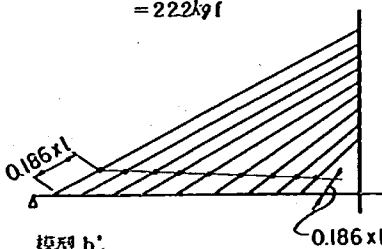
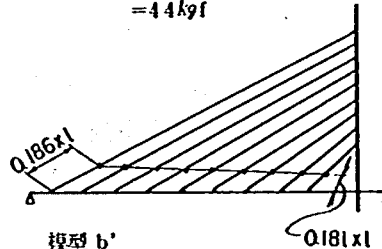
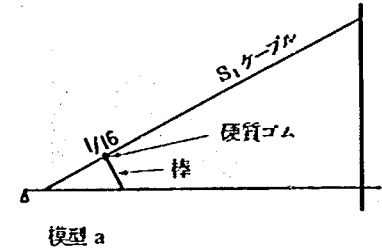
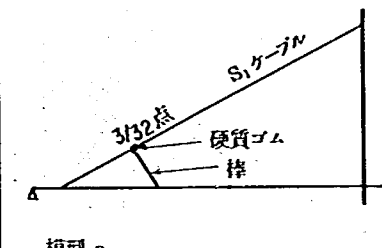
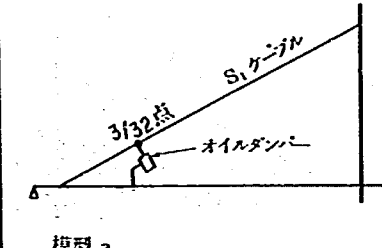
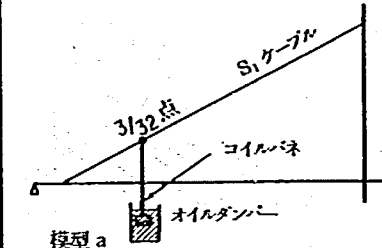
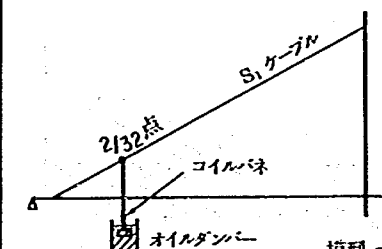
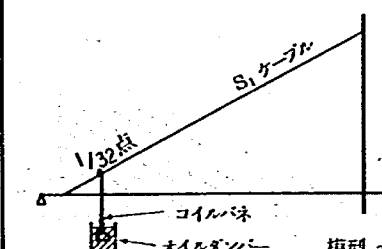
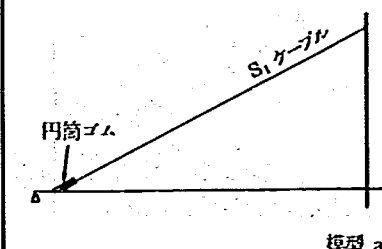
実験番号 10	実験番号 11	実験番号 12
全段連結 (注意)釣り系(0.3φmm)1本使用 釣り系の強度(EA) =222kgf  模型 b'	全段連結 (注意)釣り系(0.3φmm)2本使用 釣り系の強度(EA) =44kgf  模型 b'	制振棒  模型 a
実験番号 13	実験番号 14	実験番号 15
制振棒(1)  模型 a	オイルダンパー(1) (注意)強粘性オイル使用  模型 a	オイルダンパー(2) (注意)シリコンオイル+コイルバネ使用  模型 a
実験番号 16	実験番号 17	実験番号 18
オイルダンパー(2) (注意)シリコンオイル+コイルバネ使用  模型 a	オイルダンパー(2) (注意)シリコンオイル+コイルバネ使用  模型 a	円筒ゴム (注意)硬質ゴム使用  模型 a

図-6.2 実験ケースの図解(その2)

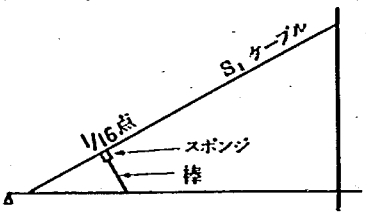
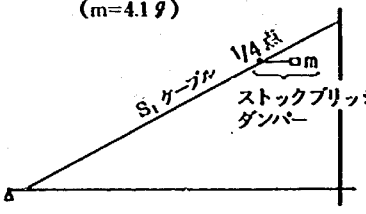
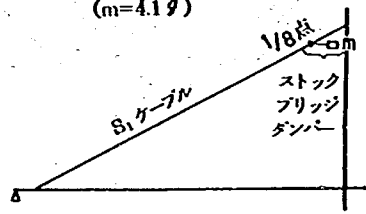
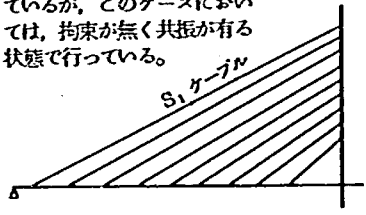
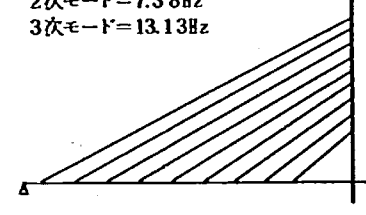
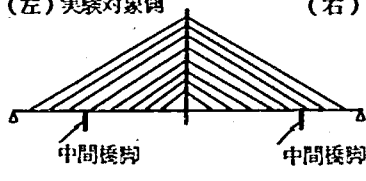
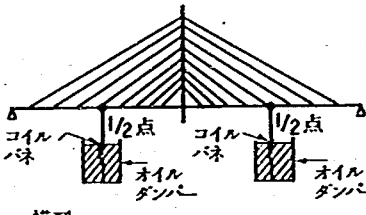
実験番号 19	実験番号 20	実験番号 21
制振棒(2)  1/16点 スポンジ 棒 模型 a	ストックブリッジダンパー (注意)総重量=10.6g ($m=4.1g$)  1/4点 ストックブリッジダンパー 模型 a	ストックブリッジダンパー (注意)総重量=10.6g ($m=4.1g$)  1/8点 ストックブリッジダンパー 模型 a
実験番号 22	実験番号 23	実験番号 24
基本模型(制振対策無) (注意)他実験ケースでは、反対側ケーブル(S_1, S_2, S_3)を共振しないように拘束しているが、このケースにおいては、拘束が無く共振が有る状態で行っている。  S1 ケーブル 模型 a	桁重量軽減(制振対策無) (注意)この時の桁振動数 1次モード=3.25Hz 2次モード=7.38Hz 3次モード=13.13Hz  模型	中間橋脚 (左)実験対象側 (右)  中間橋脚 中間橋脚 模型
実験番号 25		
桁にオイルダンパー取付け(制振対策無) (注意)シリコンオイル+コイルバネ使用  コイルバネ 1/2点 オイルダンパー 模型 a		

図-6.3 実験ケースの図解(その3)

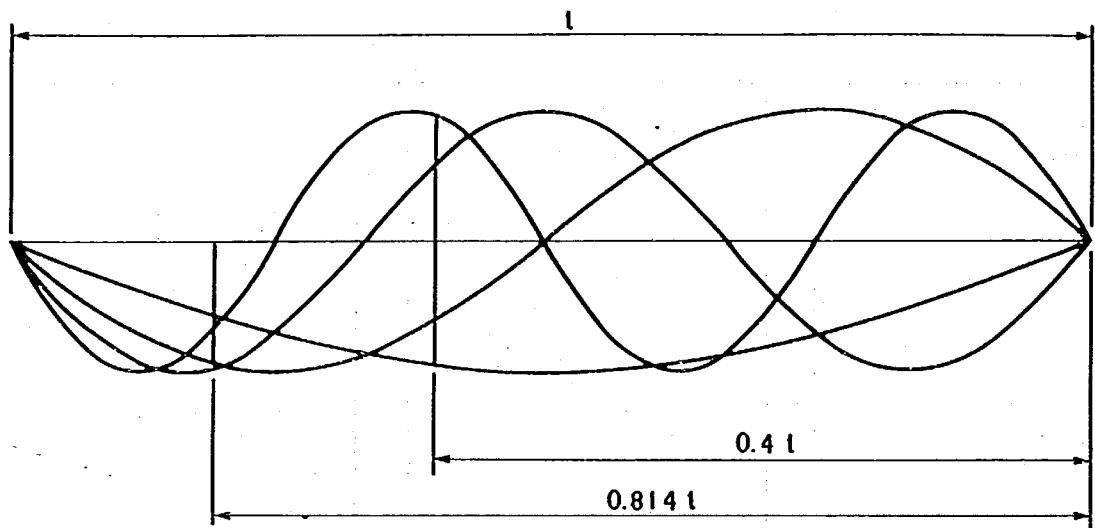


図-7 モード形状と連結位置の関係

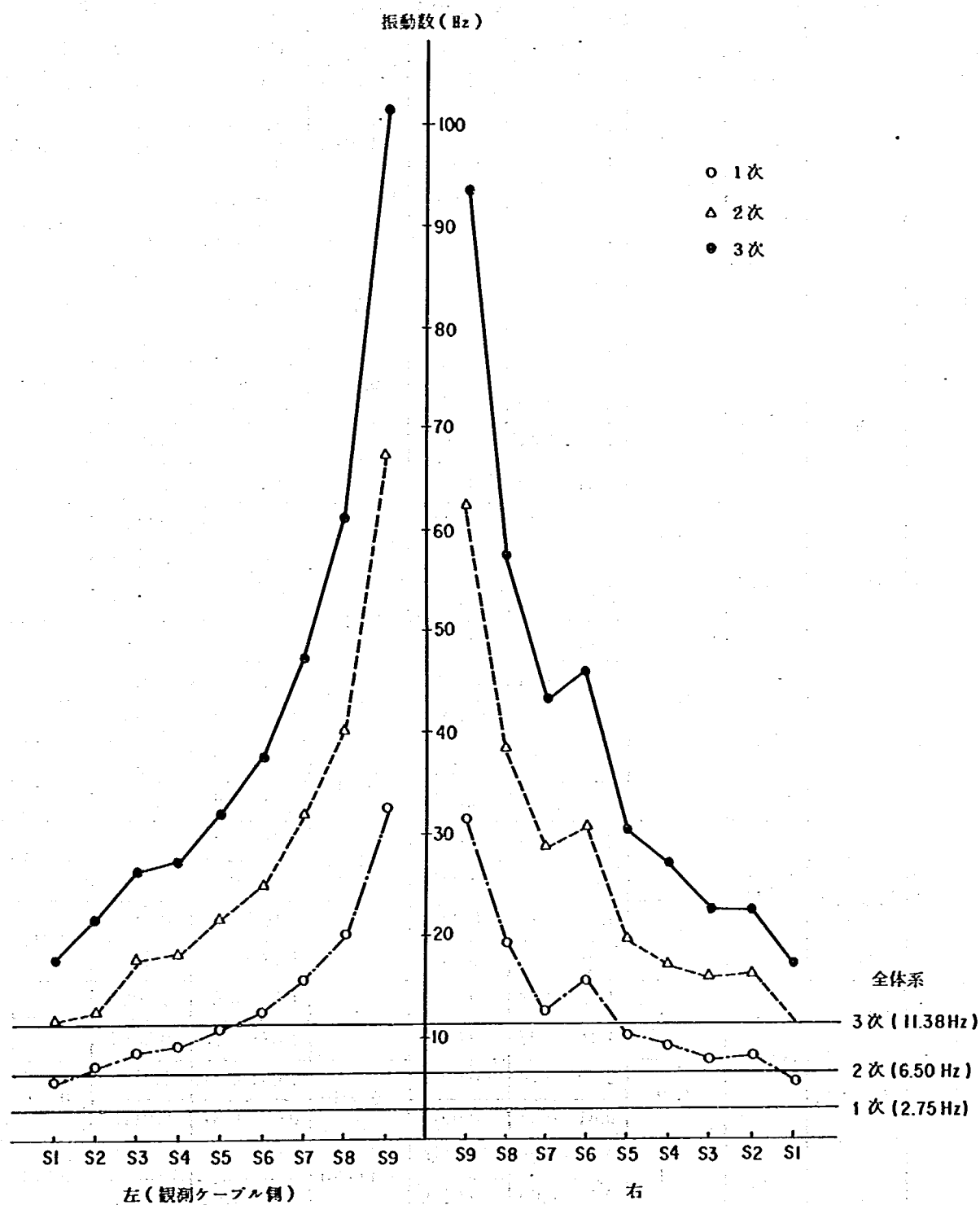


図-8 ケーブルの振動数

表-3.1 制振方法と対数減衰率(実験番号1~2)

実験番号	加振対象		対数減衰率を求めた項目	強制加振時の負減衰			定常振動からの自由減衰		
	ケーブル桁	振動数(Hz)		(片)振幅(μm)	対数減衰率	対数減衰率の平均値	(片)振幅(μm)	対数減衰率	対数減衰率の平均値
1	S1ケーブル	6.00	S1	1.35-0.60	-0.0160	-0.0155	1.15-0.85	0.0060	0.0060
				1.36-0.63	-0.0150		1.15-0.85	0.0060	
		12.13	S1	1.21-0.77	-0.0090	-0.0090	1.21-1.18	0.0053	0.0052
				1.26-0.81	-0.0090		1.15-0.89	0.0050	
		18.00	S1	0.63-0.55	-0.0030	-0.0033	0.62-0.40	0.0086	0.0084
				0.60-0.50	-0.0036		0.61-0.40	0.0083	
	桁	6.50	S1	0.23-0.20	-0.0030	-0.0025	0.28-0.18	0.0087	0.0088
				0.21-0.19	-0.0020		0.22-0.14	0.0089	
			桁	1.28-0.81	-0.0091	-0.0086	1.56-1.03	0.0082	0.0083
				1.34-0.89	-0.0080		1.56-0.88	0.0083	
2	S1ケーブル	9.50	S1	0.73-0.42	-0.0110	-0.0100	0.96-0.69	0.0064	0.0060
				0.81-0.52	-0.0089		0.95-0.72	0.0054	
			S2	0.14-0.07	-0.0130	-0.0110	0.17-0.12	0.0071	0.0066
				0.12-0.08	-0.0086		0.16-0.12	0.0061	
	S2ケーブル	11.75	S1	0.13-0.08	-0.0092	-0.0090	0.14-0.07	0.0140	0.0150
				0.13-0.08	-0.0083		0.14-0.06	0.0160	
			S2	0.56-0.40	-0.0066	-0.0060	0.56-0.28	0.0140	0.0140
				0.57-0.42	-0.0057		0.58-0.28	0.0140	
	S1ケーブル	13.50	S1	0.32-0.26	-0.0041	-0.0050	0.35-0.20	0.0110	0.0110
				0.32-0.24	-0.0056		0.34-0.19	0.0110	
			S2	1.08-0.88	-0.0041	-0.0040	1.16-0.68	0.0100	0.0105
				1.05-0.86	-0.0039		1.12-0.64	0.0110	
	S1 S2 ケーブル	9.50 11.75	S1	1.12-0.93	-0.0037	-0.0036	1.08-0.80	0.0059	0.0063
				1.16-0.97	-0.0035		1.37-0.98	0.0066	
			S2	0.82-0.79	-0.0006	-0.0010	0.45-0.27	0.0100	0.0105
				0.81-0.77	-0.0010		0.68-0.37	0.0110	
	桁	11.38	S1	0.12-0.08	-0.0080	-0.0070	0.16-0.05	0.0240	0.0240
				0.16-0.09	-0.0056		0.16-0.04	0.0240	
			桁	0.06-0.04	-0.0080	-0.0070	0.06-0.02	0.0270	0.0260
				0.06-0.04	-0.0061		0.06-0.02	0.0250	

表-3.2 制振方法と対数減衰率(実験番号3)

実験番号	加振対象		対数減衰率を求めた項目	強制加振時の負減衰			定常振動からの自由減衰		
	ケーブル桁	振動数(Hz)		(片)振幅(μ)	対数減衰率	対数減衰率の平均値	(片)振幅(μ)	対数減衰率	対数減衰率の平均値
3	① S1ケーブル	7.00	S 1	1.30-0.70	-0.0120	-0.0130	1.43-0.75	0.0130	0.0135
				1.30-0.65	-0.0140		1.50-0.75	0.0140	
			S 2	1.17-0.90	-0.0051	-0.0054	1.40-0.70	0.0140	0.0140
				1.16-0.87	-0.0056		1.40-0.70	0.0140	
	② S2ケーブル	10.63	S 1	1.04-0.65	-0.0093	-0.0068	1.08-0.64	0.0103	0.0103
				0.99-0.80	-0.0042		1.08-0.64	0.0103	
			S 2	0.64-0.32	-0.0140	-0.0088	0.75-0.44	0.0106	0.0104
				0.72-0.60	-0.0036		0.76-0.45	0.0101	
	③ S2ケーブル	12.75	S 1	0.20-0.16	-0.0044	-0.0049	0.17-0.08	0.0150	0.0160
				0.20-0.15	-0.0054		0.18-0.08	0.0170	
			S 2	0.95-0.86	-0.0021	-0.0034	0.84-0.40	0.0140	0.0145
				0.88-0.70	-0.0046		0.80-0.38	0.0150	
	④ S1 S2 ケーブル	7.00 10.63	S 1	1.92-0.50	-0.0260	-0.0330	1.37-0.78	0.0110	0.0115
				1.80-0.95	-0.0400		1.40-1.10	0.0120	
			S 2	1.43-0.48	-0.0210	-0.0170	1.22-0.61	0.0140	0.0145
				1.32-1.11	-0.0120		1.77-1.30	0.0150	
	⑤ S1 S2 ケーブル	10.63 12.75	S 1	1.20-0.80	-0.0099	-0.0103	1.35-0.80	0.0105	0.0109
				1.20-0.70	-0.0106		1.40-0.80	0.0112	
			S 2	1.40-0.85	-0.0120	-0.0135	1.30-0.70	0.0151	0.0146
				1.30-0.62	-0.0150		1.55-0.78	0.0140	
	⑥ 桁	11.38	S 1	0.024-0.02	-0.0036	-0.0051	0.024-0.02	0.0140	0.0155
				0.03-0.02	-0.0066		0.03-0.02	0.0170	
			桁	0.04-0.030	-0.0064	-0.0068	0.05-0.02	0.0180	0.0185
				0.04-0.030	-0.0071		0.05-0.02	0.0190	

表-3.3 制振方法と対数減衰率(実験番号4)

実験番号	加振対象		対数減衰率を求めた項目	強制加振時の負減衰			定常振動からの自由減衰		
	ケーブル 桁	振動数 (Hz)		(片)振幅 (mm)	対数減衰率	対数減衰率の 平均値	(片)振幅 (mm)	対数減衰率	対数減衰率の 平均値
4	① S1ケーブル	7.50	S 1	1.21-0.80	-0.0081	-0.0081	1.20-0.80	0.0080	0.0081
				1.21-0.80	-0.0081		1.21-0.80	0.0081	
			S 2	0.81-0.50	-0.0095	-0.0093	0.80-0.50	0.0092	0.0092
				0.81-0.51	-0.0091		0.80-0.50	0.0092	
	② S1ケーブル	10.38	S 1	1.08-0.80	-0.0059	-0.0095	0.86-0.52	0.0099	0.0101
				1.16-0.60	-0.0130		0.84-0.48	0.0110	
			S 2	0.66-0.49	-0.0059	-0.0100	0.52-0.32	0.0095	0.0099
				0.68-0.33	-0.0140		0.52-0.31	0.0103	
	③ S2ケーブル	12.63	S 1	0.12-0.08	-0.0086	-0.0061	0.12-0.07	0.0100	0.0121
				0.12-0.10	-0.0036		0.12-0.06	0.0142	
			S 2	0.73-0.45	-0.0096	-0.0073	0.76-0.34	0.0157	0.0158
				0.74-0.57	-0.0049		0.72-0.32	0.0159	
	④ S1 S2 ケーブル	7.50 10.38	S 1	1.70-0.70	-0.0206	-0.0215	1.30-0.85	0.0083	0.0088
				1.68-0.54	-0.0223		1.30-0.81	0.0093	
			S 2	1.22-0.7	-0.0109	-0.0119	1.40-0.87	0.0093	0.0094
				1.28-0.67	-0.0129		1.30-0.80	0.0095	
	⑤ S1 S2 ケーブル	10.38 12.63	S 1	1.05-0.74	-0.0084	-0.0081	0.96-0.52	0.0120	0.0115
				1.08-0.72	-0.0077		0.94-0.52	0.0110	
			S 2	1.21-0.85	-0.0080	-0.0071	1.32-0.71	0.0123	0.0121
				1.36-0.85	-0.0062		1.24-0.64	0.0118	
	⑥ 桁	11.38	S 1	0.12-0.10	-0.0036	-0.0051	0.14-0.06	0.0166	0.0167
				0.11-0.08	-0.0066		0.16-0.07	0.0168	
			桁	0.14-0.11	-0.0045	-0.0045	0.16-0.07	0.0154	0.0151
				0.12-0.096	-0.0044		0.17-0.08	0.0147	

表-3.4 制振方法と対数減衰率(実験第番5~6)

実験番号	加振対象		対数減衰率を求めた項目	強制加振時の負減衰			定常振動からの自由減衰		
	ケーブル桁	振動数(Hz)		(片)振幅(mm)	対数減衰率	対数減衰率の平均値	(片)振幅(mm)	対数減衰率	対数減衰率の平均値
5	① S1ケーブル	6.88	S 1	0.25-0.11	-0.0990	-0.0970	1.12-0.04	0.0330*	0.0320
				0.27-0.12	-0.0950		1.12-0.04	0.0300*	
			S 2	0.13-0.08	-0.0590	-0.0710	0.06-0.02	0.0300	0.0330
				0.14-0.06	-0.0820		0.06-0.02	0.0360	
	② S2ケーブル	9.63	S 1	0.24-0.08	-0.0350	-0.0350	0.20-0.08	0.0460	0.0490
				0.24-0.08	-0.0350		0.20-0.04	0.0520	
			S 2	0.32-0.08	-0.0440	-0.0450	0.24-0.08	0.0530	0.0530
				0.32-0.08	-0.0450		0.24-0.05	0.0520	
	③ S1ケーブル	12.63	S 1	0.67-0.14	-0.0510	-0.0490	0.78-0.12	0.0450	0.0440
				0.68-0.16	-0.0470		0.79-0.14	0.0420	
			S 2	0.56-0.12	-0.0500	-0.0460	0.68-0.12	0.0420	0.0420
				0.58-0.16	-0.0410		0.65-0.12	0.0410	
	④ S1 S2 ケーブル	6.88 9.63	S 1	0.40-0.25	-0.0560	-0.0510	0.40-0.08	0.0950	0.1015
				0.33-0.20	-0.0460		0.36-0.08	0.1080	
			S 2	0.35-0.16	-0.0540	-0.0460	0.32-0.12	0.0660	0.0735
				0.35-0.20	-0.0380		0.32-0.08	0.0810	
6	① S1ケーブル	9.00	S 1	0.89-0.72	-0.0042	-0.0032	0.90-0.39	0.0163	0.0160
				0.96-0.86	-0.0021		0.96-0.43	0.0157	
			S 2	0.24-0.16	-0.0080	-0.0050	0.20-0.09	0.0161	0.0164
				0.26-0.24	-0.0020		0.28-0.12	0.0166	
	② S2ケーブル	11.25	S 1	0.48-0.25	-0.0126	-0.0094	0.51-0.36	0.0068	0.0068
				0.56-0.41	-0.0062		0.50-0.36	0.0067	
			S 2	0.60-0.30	-0.0133	-0.0097	0.66-0.45	0.0076	0.0075
				0.74-0.54	-0.0061		0.64-0.44	0.0073	
	③ S1ケーブル	17.13	S 1	0.40-0.32	-0.0044	-0.0044	0.36-0.20	0.0115	0.0116
				0.40-0.32	-0.0044		0.40-0.22	0.0117	
			S 2	0.32-0.24	-0.0053	-0.0052	0.28-0.15	0.0120	0.0119
				0.31-0.24	-0.0051		0.30-0.16	0.0118	
	④ S1ケーブル	13.13	S 1	0.39-0.24	-0.0095	-0.0099	0.30-0.20	0.0080	0.0096
				0.32-0.19	-0.0102		0.37-0.21	0.0111	
			S 2	1.30-0.70	-0.0121	-0.0121	1.20-0.80	0.0080	0.0077
				1.30-0.70	-0.0121		1.30-0.89	0.0074	

*自由減衰時, うなり現象。

表-3.5 制振方法と対数減衰率(実験番号7~8)

実験番号	加振対象		対数減衰率を求めた項目	強制加振時の負減衰			定常振動からの自由減衰		
	ケーブル桁	振動数(Hz)		(片)振幅(μ)	対数減衰率	対数減衰率の平均値	(片)振幅(μ)	対数減衰率	対数減衰率の平均値
7	① S1ケーブル	10.13	S1	0.68-0.51	-0.0057	-0.0070	0.44-0.38	0.0031	0.0029
				0.52-0.34	-0.0083		0.32-0.28	0.0026	
			S2	0.55-0.42	-0.0055	-0.0062	0.36-0.32	0.0025	0.0033
				0.42-0.30	-0.0069		0.28-0.23	0.0040	
	② S1ケーブル	14.13	S1	0.56-0.41	-0.0062	-0.0061	0.76-0.48	0.0088	0.0088
				0.60-0.44	-0.0059		0.75-0.48	0.0088	
			S2	0.60-0.44	-0.0063	-0.0057	0.77-0.50	0.0085	0.0090
				0.62-0.48	-0.0050		0.79-0.49	0.0095	
	③ 桁	11.38	S1			*1	0.25-0.09	0.0173	0.0163
							0.28-0.13	0.0153	
			桁	0.12-0.098	-0.0043	-0.0044	0.17-0.07	0.0141	0.0133
				0.12-0.096	-0.0044		0.18-0.098	0.0124	
8	① S1ケーブル	9.75	S1	1.50-0.60	-0.0180	-0.0195	1.30-0.91	0.0065	0.0067
				1.50-0.52	-0.0210		1.20-0.85	0.0068	
			S2	0.77-0.30	-0.0180	-0.0185	0.61-0.48	0.0047	0.0056
				0.78-0.30	-0.0190		0.60-0.43	0.0065	
	② S1ケーブル	12.00	S1	1.24-0.31	-0.0450	-0.0445	1.00-0.36	0.0200	0.0205
				1.24-0.32	-0.0440		1.04-0.36	0.0210	
			S2			*2			*2
	③ S2ケーブル	13.50	S1	1.16-0.80	-0.0073	-0.0082	1.04-0.64	0.0095	0.0108
				1.17-0.74	-0.0090		1.20-0.64	0.0120	
			S2	1.04-0.84	-0.0052	-0.0062	0.92-0.59	0.0086	0.0098
				1.08-0.76	-0.0071		1.01-0.57	0.0110	
	④ S1 S2 ケーブル	12.00 13.50	S1	2.65-0.59	-0.0370	-0.0355	1.25-0.80	0.0093	0.0094
				2.80-0.52	-0.0340		1.30-0.82	0.0094	
			S2	1.00-0.50	-0.0140	-0.0118	1.00-0.50	0.0140	0.0135
				0.80-0.50	-0.0096		1.20-0.61	0.0130	
	⑤ S1 S2 ケーブル	9.75 13.50	S1	1.80-0.60	-0.0220	-0.0215	1.20-0.90	0.0056	0.0055
				1.70-0.62	-0.0210		1.18-0.90	0.0053	
			S2	1.20-0.80	-0.0100	-0.0125	0.60-0.45	0.0056	0.0057
				1.30-0.60	-0.0150		0.70-0.52	0.0058	
	⑥ 桁	11.38	S1	0.16-0.05	-0.0360	-0.0335	0.17-0.04	0.0260	0.0260
				0.19-0.04	-0.0310		0.16-0.04	0.0260	
			桁	0.31-0.10	-0.0380	-0.0345	0.33-0.10	0.0240	0.0245
				0.34-0.10	-0.0310		0.33-0.09	0.0250	

*1 加振時、うなり現象。 *2 ほとんど振動せず。

表-3.6 制振方法と対数減衰率(実験番号9)

実験番号	加振対象		対数減衰率を求めた項目	強制加振時の負減衰			定常振動からの自由減衰		
	ケーブル桁	振動数(Hz)		(片)振幅(mm)	対数減衰率	対数減衰率の平均値	(片)振幅(mm)	対数減衰率	対数減衰率の平均値
9	① S1ケーブル	7.13	S 1	1.50-0.50	-0.0220	-0.0220	1.19-0.93	0.0048	0.0043
				1.50-0.50	-0.0220		1.20-0.99	0.0038	
			S 2	0.79-0.45	-0.0110	-0.0097	0.70-0.60	0.0030	0.0028
				0.84-0.55	-0.0083		0.80-0.70	0.0026	
	② S2ケーブル	8.75	S 1	0.53-0.36	-0.0073	-0.0072	0.48-0.38	0.0046	0.0051
				0.50-0.36	-0.0070		0.40-0.30	0.0056	
			S 2	1.74-0.15	-0.0480	-0.0460	1.13-0.99	0.0026	0.0028
				1.79-0.20	-0.0430		1.05-0.90	0.0030	
	③ S2ケーブル	10.50	S 1	0.35-0.29	-0.0037	-0.0052	0.31-0.28	0.0020	0.0017
				0.28-0.20	-0.0066		0.30-0.28	0.0014	
			S 2	0.22-0.18	-0.0039	-0.0055	0.21-0.17	0.0041	0.0044
				0.20-0.14	-0.0070		0.19-0.15	0.0046	
	④ S1 S2 ケーブル	7.13 8.75	S 1	1.68-0.42	-0.0300	-0.0290	1.08-0.90	0.0039	0.0037
				1.70-0.50	-0.0270		1.12-0.95	0.0035	
			S 2	2.00-0.50	-0.0280	-0.0320	1.10-0.96	0.0030	0.0030
				2.22-0.38	-0.0350		1.15-1.00	0.0030	
	⑤ S1 S2 ケーブル	7.13 10.50	S 1	1.57-0.55	-0.0230	-0.0240	1.12-0.99	0.0029	0.0036
				1.50-0.49	-0.0240		1.10-0.92	0.0042	
			S 2	0.84-0.51	-0.0120	-0.0097	0.49-0.40	0.0047	0.0049
				1.05-0.75	-0.0073		0.50-0.40	0.0051	
	⑥ 桁	6.50	S 1	0.24-0.12	-0.0130	-0.0130	0.68-0.48	0.0068	0.0061
				0.32-0.17	-0.0130		0.67-0.51	0.0053	
			桁	0.59-0.44	-0.0056	-0.0053	0.73-0.33	0.0160	0.0170
				0.66-0.51	-0.0049		0.70-0.29	0.0170	
	⑦ 桁	11.38	S 1	0.08-0.06	-0.0046	-0.0040	0.12-0.08	0.0070	0.0056
				0.10-0.09	-0.0033		0.12-0.10	0.0042	
			桁	0.17-0.14	-0.0030	-0.0030	0.20-0.14	0.0066	0.0073
				0.17-0.14	-0.0030		0.22-0.14	0.0080	

表-3.7 制振方法と対数減衰率(実験番号10~12)

実験番号	加振対象		対数減衰率を求めた項目	強制加振時の負減衰			定常振動からの自由減衰		
	ケーブル桁	振動数(Hz)		(片)振幅(μ)	対数減衰率	対数減衰率の平均値	(片)振幅(μ)	対数減衰率	対数減衰率の平均値
10	① S1ケーブル	6.75	S 1	1.50-0.55	-0.0197	-0.0204	1.70-0.50	0.0240	0.0241
				1.46-0.50	-0.0210		1.72-0.50	0.0242	
			S 2	0.95-0.76	-0.0044	-0.0044	1.00-0.32	0.0223	0.0215
				0.93-0.75	-0.0042		1.00-0.35	0.0206	
	② S2ケーブル	8.50	S 1	0.52-0.45	-0.0028	-0.0036	0.40-0.30	0.0056	0.0056
				0.50-0.40	-0.0044		0.40-0.30	0.0056	
			S 2	1.80-0.30	-0.0390	-0.0390	1.24-0.90	0.0063	0.0061
				1.80-0.30	-0.0390		1.21-0.90	0.0058	
	③ S1ケーブル	13.63	S 1	1.50-0.40	-0.0260	-0.0260	1.39-0.80	0.0108	0.0108
				1.51-0.40	-0.0260		1.38-0.80	0.0107	
			S 2	0.70-0.43	-0.0096	-0.0102	0.60-0.32	0.0123	0.0117
				0.69-0.40	-0.0107		0.72-0.41	0.0110	
11	① S1ケーブル	6.88	S 1	1.40-0.61	-0.0163	-0.0163	1.63-0.60	0.0196	0.0199
				1.40-0.61	-0.0163		1.68-0.60	0.0202	
			S 2	0.85-0.69	-0.0041	-0.0067	0.98-0.40	0.0175	0.0172
				0.72-0.45	-0.0092		0.90-0.38	0.0169	
	② S2ケーブル	8.63	S 1	0.40-0.13	-0.0274	-0.0222	0.32-0.21	0.0083	0.0088
				0.40-0.20	-0.0169		0.37-0.23	0.0093	
			S 2	1.85-0.36	-0.0321	-0.0333	1.10-0.82	0.0058	0.0056
				1.70-0.35	-0.0344		1.18-0.90	0.0053	
	③ S1ケーブル	13.75	S 1	1.40-0.49	-0.0206	-0.0198	1.30-0.80	0.0095	0.0091
				1.45-0.50	-0.0173		1.32-0.85	0.0086	
			S 2	0.60-0.40	-0.0080	-0.0085	0.50-0.30	0.0100	0.0100
				0.60-0.38	-0.0090		0.58-0.35	0.0099	
12	① S1ケーブル	6.38	S 1	1.41-0.60	-0.0168	-0.0172	1.20-0.90	0.0056	0.0056
				1.39-0.57	-0.0175		1.20-0.90	0.0056	
		12.75	S 1	1.21-0.70	-0.0107	-0.0107	1.30-0.80	0.0095	0.0095
				1.20-0.70	-0.0106		1.30-0.80	0.0095	
		18.88	S 1	0.86-0.61	-0.0067	-0.0045	0.90-0.52	0.0104	0.0101
				0.90-0.80	-0.0023		0.92-0.56	0.0097	

表-3.8 制振方法と対数減衰率(実験番号13~17)

実験番号	加振対象		対数減衰率を求めた項目	強制加振時の負減衰			定常振動からの自由減衰		
	ケーブル桁	振動数(Hz)		(片)振幅(mm)	対数減衰率	対数減衰率の平均値	(片)振幅(mm)	対数減衰率	対数減衰率の平均値
13	S1ケーブル	6.50	S1	0.56-0.04	-0.0087*	-0.0088	0.56-0.40	0.0058*	0.0058
				0.52-0.32	-0.0089*		0.56-0.40	0.0057*	
		13.13	S1	0.84-0.36	-0.0164	-0.0177	0.76-0.32	0.0167	0.0167
				0.79-0.36	-0.0190		0.84-0.36	0.0166	
		19.38	S1	0.33-0.20	-0.0135	-0.0157	0.29-0.16	0.0118	0.0118
				0.35-0.20	-0.0179		0.31-0.16	0.0117	
14	S1ケーブル	6.50	S1	0.36-0.16	-0.0557*	-0.0604	0.27-0.20	0.0039*	0.0049
				0.32-0.12	-0.0650*		0.28-0.18	0.0059*	
		6.50	S1	0.40-0.36	-0.0611	-0.0672	0.36-0.32	0.0023	0.0026
				0.48-0.16	-0.0732		0.32-0.28	0.0029	
		13.25	S1	0.40-0.16	-0.0611	-0.0606	0.40-0.26	0.0081	0.0080
				0.40-0.16	-0.0601		0.36-0.24	0.0078	
		19.25	S1	0.32-0.19	-0.0119*	-0.0114	0.24-0.14	0.0117	0.0131
				0.31-0.20	-0.0108*		0.28-0.14	0.0144	
15	S1ケーブル	6.00	S1	0.79-0.52	-0.0136	-0.0131	0.84-0.20	0.0281	0.0308
				0.79-0.53	-0.0126		0.88-0.16	0.0334	
		12.13	S1	0.32-0.22	-0.0223	-0.0196	0.32-0.08	0.0660	0.0645
				0.32-0.24	-0.0169		0.30-0.08	0.0629	
		18.00	S1	0.13-0.11	-0.0083	-0.0083	0.12-0.04	0.0912	0.0906
				0.13-0.11	-0.0083		0.14-0.05	0.0900	
16	S1ケーブル	6.00	S1	1.26-0.70	-0.0143	-0.0148	1.45-0.69	0.0146	0.0148
				1.30-0.60	-0.0152		1.50-0.70	0.0149	
		12.00	S1	0.72-0.52	-0.0079	-0.0073	0.76-0.20	0.0258	0.0259
				0.76-0.58	-0.0066		0.75-0.20	0.0260	
		17.80	S1	0.19-0.16	-0.0077	-0.0074	0.20-0.05	0.0284	0.0254
				0.23-0.20	-0.0071		0.20-0.06	0.0223	
17	S1ケーブル	6.00	S1	1.61-0.56	-0.0230	-0.0254	1.19-0.86	0.0064	0.0060
				1.60-0.39	-0.0277		1.20-0.90	0.0056	
		12.00	S1	1.32-0.60	-0.0155	-0.0156	1.16-0.80	0.0073	0.0074
				1.33-0.60	-0.0156		1.20-0.82	0.0075	
		17.88	S1	0.46-0.28	-0.0096	-0.0094	0.48-0.24	0.0136	0.0136
				0.45-0.28	-0.0092		0.48-0.24	0.0136	

* 加振・自由減衰時共に、うなり現象。

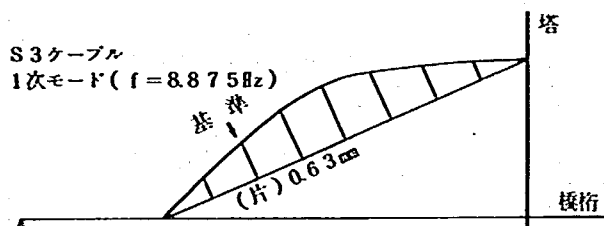
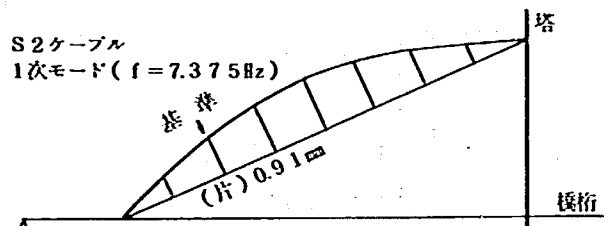
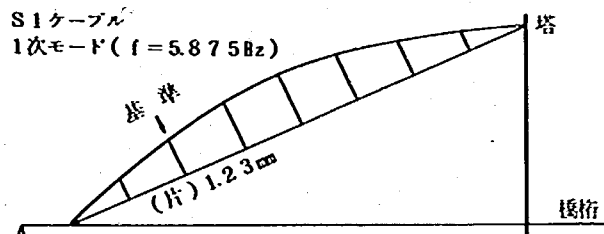
表-3.9 制振方法と対数減衰率(実験番号18~22)

実験番号	加振対象		対数減衰率を求めた項目	強制加振時の負減衰			定常振動からの自由減衰		
	ケーブル桁	振動数(Hz)		(片)振幅(μm)	対数減衰率	対数減衰率の平均値	(片)振幅(μm)	対数減衰率	対数減衰率の平均値
18	S1ケーブル	6.00	S1	1.68-0.40	-0.0281	-0.0283	1.20-0.90	0.0056	0.0056
				1.70-0.40	-0.0284		1.20-0.90	0.0056	
		12.00	S1	1.50-0.53	-0.0204	-0.0193	1.11-0.90	0.0041	0.0042
				1.42-0.56	-0.0182		1.12-0.90	0.0043	
		17.88	S1	0.56-0.38	-0.0076	-0.0057	0.68-0.36	0.0124	0.0120
				0.59-0.49	-0.0037		0.65-0.36	0.0116	
19	S1ケーブル	6.13	S1	1.43-0.50	-0.0500	-0.0499	2.00-0.41	0.0311	0.0316
				1.42-0.50	-0.0497		2.05-0.40	0.0320	
		12.13	S1	1.55-0.40	-0.0323	-0.0319	1.80-0.40	0.0295	0.0293
				1.58-0.42	-0.0315		1.80-0.41	0.0290	
		18.13	S1	0.92-0.31	-0.0265	-0.0255	1.05-0.40	0.0189	0.0190
				0.95-0.35	-0.0244		1.06-0.40	0.0191	
20	S1ケーブル	5.88	S1	2.10-0.41	-0.0527	-0.0526	1.30-0.90	0.0072	0.0072
				2.03-0.40	-0.0524		1.30-0.90	0.0072	
		5.63	S1	0.76-0.36	-0.0356	-0.0316	0.73-0.11	0.0367	0.0359
				0.80-0.45	-0.0276		0.72-0.12	0.0351	
		11.63	S1	1.70-0.20	-0.0420	-0.0411	1.22-0.88	0.0064	0.0074
				1.70-0.22	-0.0401		1.30-0.85	0.0083	
21	S1ケーブル	6.00	S1	1.56-0.60	-0.0455	-0.0486	1.00-0.64	0.0088	0.0084
				1.54-0.52	-0.0516		0.96-0.64	0.0080	
		5.88	S1	1.44-0.72	-0.0330	-0.0352	1.32-0.48	0.0199	0.0201
				1.40-0.64	-0.0373		1.24-0.44	0.0203	
		11.88	S1	2.11-0.51	-0.0394	-0.0394	1.17-0.81	0.0072	0.0070
				2.15-0.52	-0.0394		1.30-0.92	0.0068	
22	S1ケーブル	6.00	S1	1.40-0.41	-0.0241	-0.0241	1.30-0.79	0.0098	0.0097
				1.40-0.41	-0.0241		1.30-0.80	0.0095	
		12.13	S1	1.41-0.51	-0.0199	-0.0201	1.18-0.93	0.0047	0.0044
				1.41-0.50	-0.0203		1.14-0.93	0.0040	
		17.88	S1	0.55-0.36	-0.0043*	-0.0041	0.57-0.44	0.0050	0.0049
				0.52-0.36	-0.0038*		0.56-0.44	0.0047	

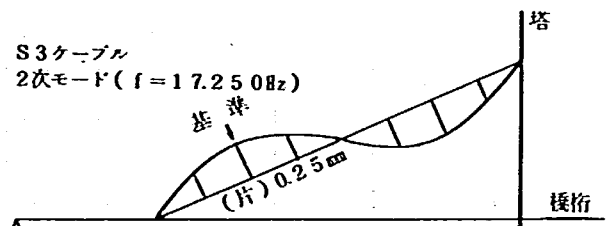
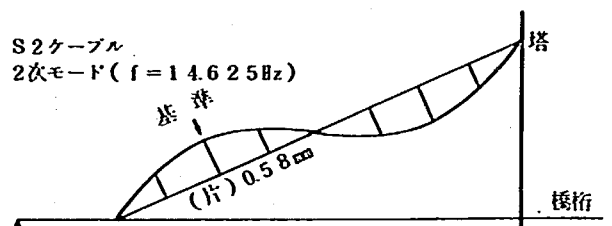
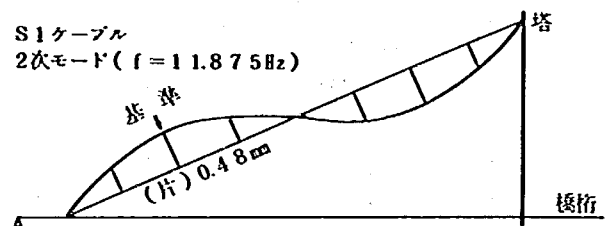
* 加振時、うなり現象。

表-3.10 制御方法と対数減衰率(実験番号23~25)

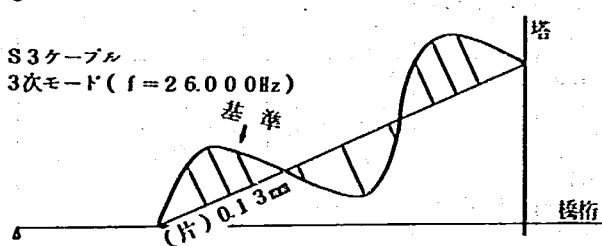
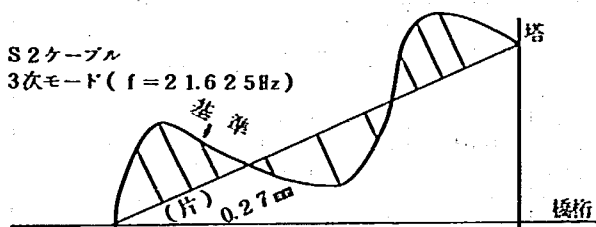
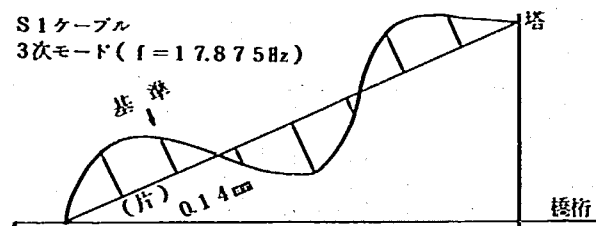
実験番号	加振対象		対数減衰率を求めた項目	強制加振時の負減衰			定常振動からの自由減衰		
	ケーブル桁	振動数(Hz)		(片)振幅(μm)	対数減衰率	対数減衰率の平均値	(片)振幅(μm)	対数減衰率	対数減衰率の平均値
23	② S2ケーブル	6.75	S 2	2.00-0.60	-0.0334	-0.0335	1.28-0.87	0.0076	0.0083
				2.01-0.60	-0.0336		1.30-0.82	0.0090	
	② 桁	7.38	S 1	0.24-0.18	-0.0056	-0.0046	0.28-0.16	0.0110	0.0108
				0.24-0.20	-0.0036		0.28-0.16	0.0105	
			S 2	1.24-1.08	-0.0027	-0.0032	1.36-0.78	0.0110	0.0109
				1.16-0.96	-0.0037		1.40-0.81	0.0108	
			桁	0.99-0.79	-0.0044	-0.0039	1.20-0.74	0.0095	0.0096
				0.97-0.82	-0.0034		1.21-0.74	0.0096	
24	① S1ケーブル	12.25	S 1	1.92-0.55	-0.0347	-0.0335	1.50-0.80	0.0123	0.0114
				1.92-0.60	-0.0323		1.40-0.82	0.0105	
	② 桁	6.50	S 1	0.30-0.24	-0.0044	-0.0038	0.34-0.23	0.0076	0.0085
				0.32-0.28	-0.0031		0.39-0.24	0.0093	
			桁	0.81-0.59	-0.0062	-0.0051	0.93-0.62	0.0077	0.0076
				0.88-0.72	-0.0040		0.97-0.66	0.0075	
	③ S1ケーブル	12.25	S 1	1.70-0.61	-0.0285	-0.0284	1.31-0.81	0.0094	0.0098
				1.72-0.62	-0.0283		1.36-0.81	0.0102	
	④ 桁	11.25	S 1	0.24-0.12	-0.0133	-0.0154	0.20-0.13	0.0081	0.0070
				0.24-0.10	-0.0175		0.20-0.15	0.0059	
			桁	0.20-0.10	-0.0136	-0.0152	0.15-0.10	0.0075	0.0074
				0.18-0.08	-0.0167		0.14-0.10	0.0073	
	⑤ S1ケーブル	12.25	S 1	1.60-0.70	-0.0230	-0.0230	1.52-0.80	0.0126	0.0125
				1.60-0.70	-0.0230		1.50-0.80	0.0123	
25	① S1ケーブル	6.00	S 1	1.40-0.70	-0.0136	-0.0136	1.20-0.91	0.0054	0.0055
				1.40-0.70	-0.0136		1.20-0.90	0.0056	
		12.13	S 1	1.20-0.85	-0.0068	-0.0068	1.20-0.88	0.0061	0.0059
				1.20-0.85	-0.0068		1.20-0.90	0.0056	
		18.00	S 1	0.56-0.50	-0.0022	-0.0028	0.53-0.35	0.0081	0.0076
				0.52-0.44	-0.0033		0.50-0.35	0.0070	
	④ 桁	6.50	S 1	0.17-0.20	-0.0040	-0.0079	0.20-0.11	0.0221	0.0230
				0.21-0.13	-0.0117		0.20-0.10	0.0239	
			桁	0.95-0.66	-0.0090	-0.0119	0.87-0.11	0.0404	0.0378
				0.89-0.48	-0.0148		0.88-0.15	0.0351	



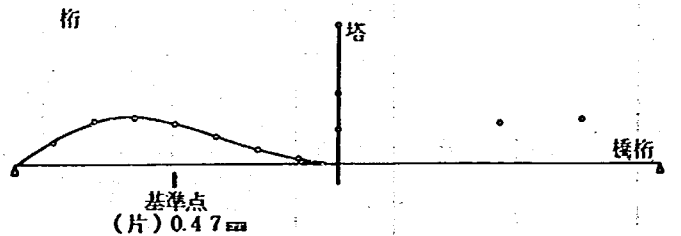
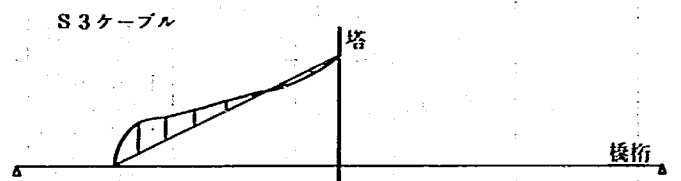
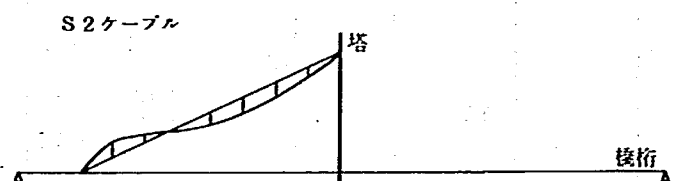
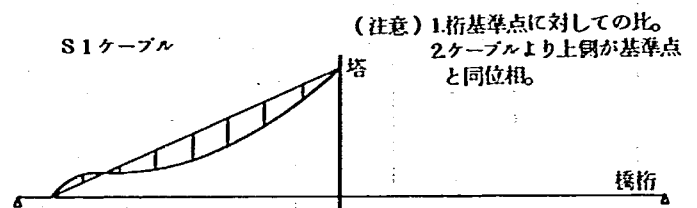
(a) 1次モード



(b) 2次モード



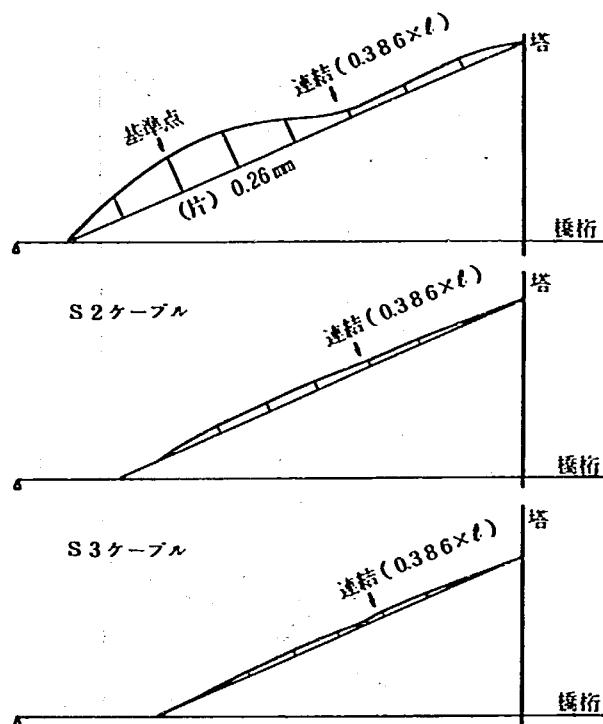
(c) 3次モード



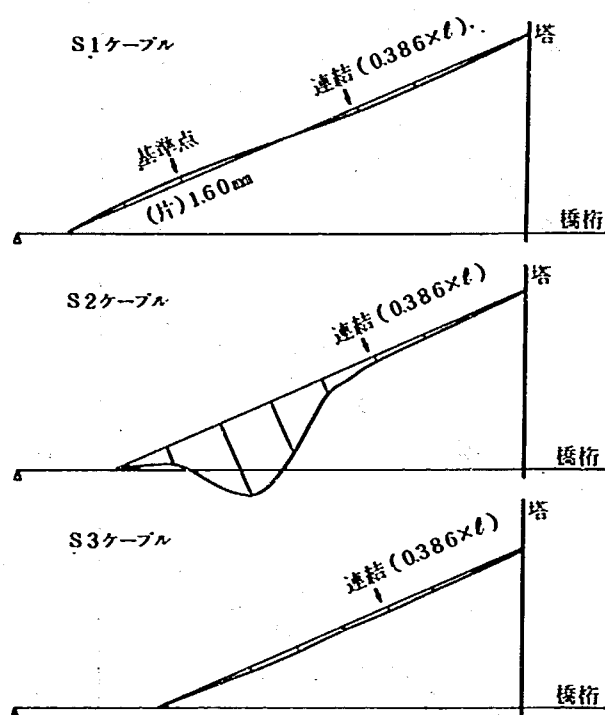
(d) 桁対称モード

図-9.1 基本模型aの固有振動 (実験ケース1)

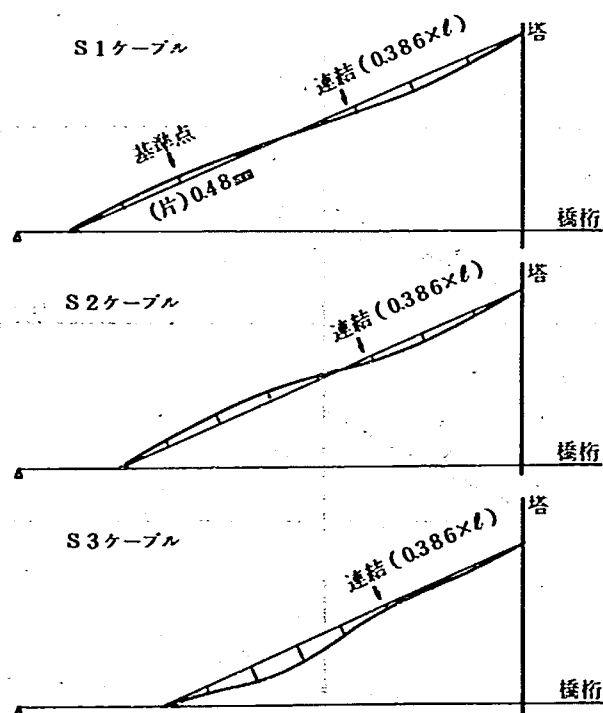
(注意) 1. S1ケーブル基準点に対しての比。
2. ケーブルより上側が基準点と同位相。



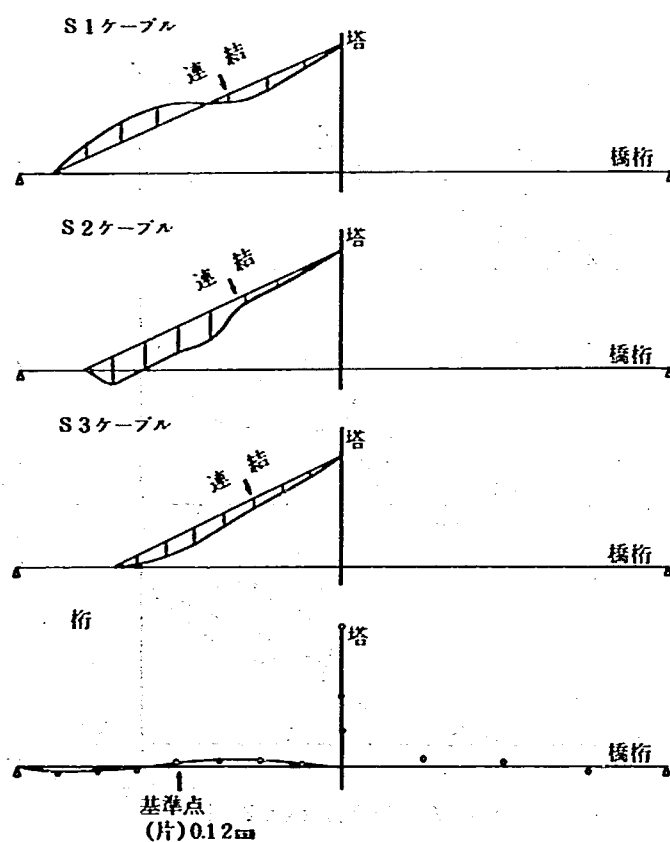
(a) $f = 9.25 \text{ Hz} (S1-1)$



(b) $f = 11.75 \text{ Hz} (S2-1)$

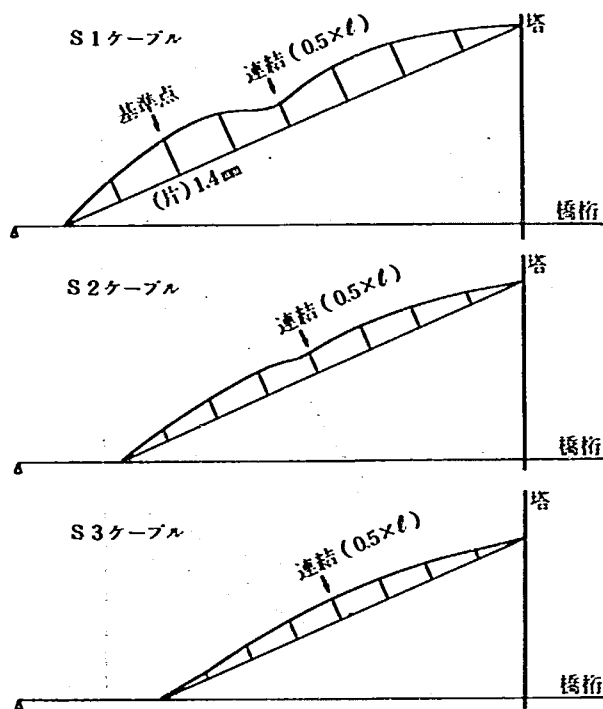


(c) $f = 13.50 \text{ Hz} (S3-1)$

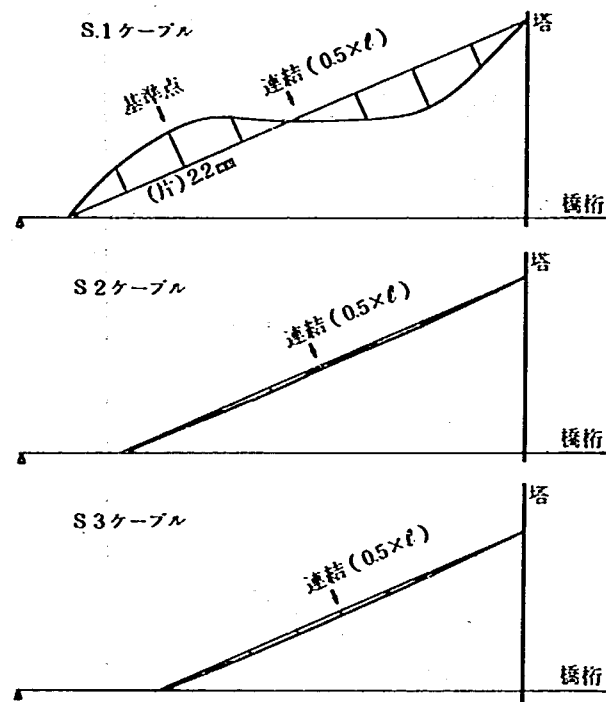


(d) 桁を 11.375 Hz で加振した場合

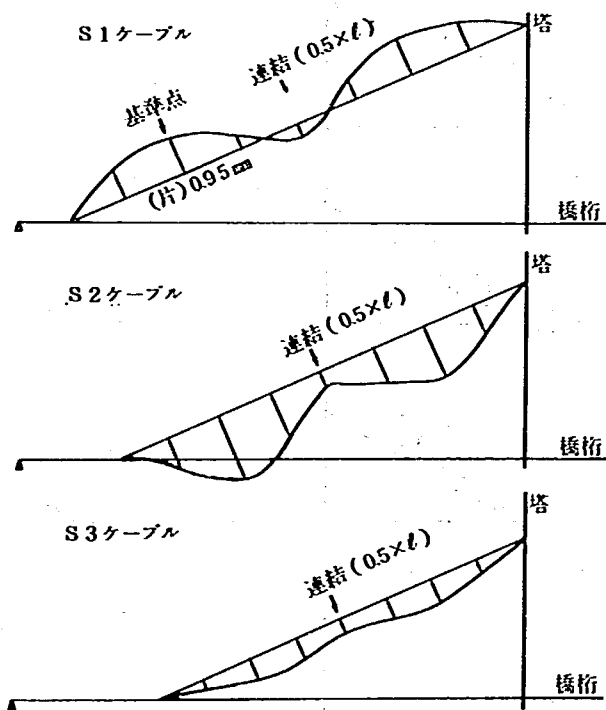
図-9.2 基本模型bの固有振動 (実験ケース2)



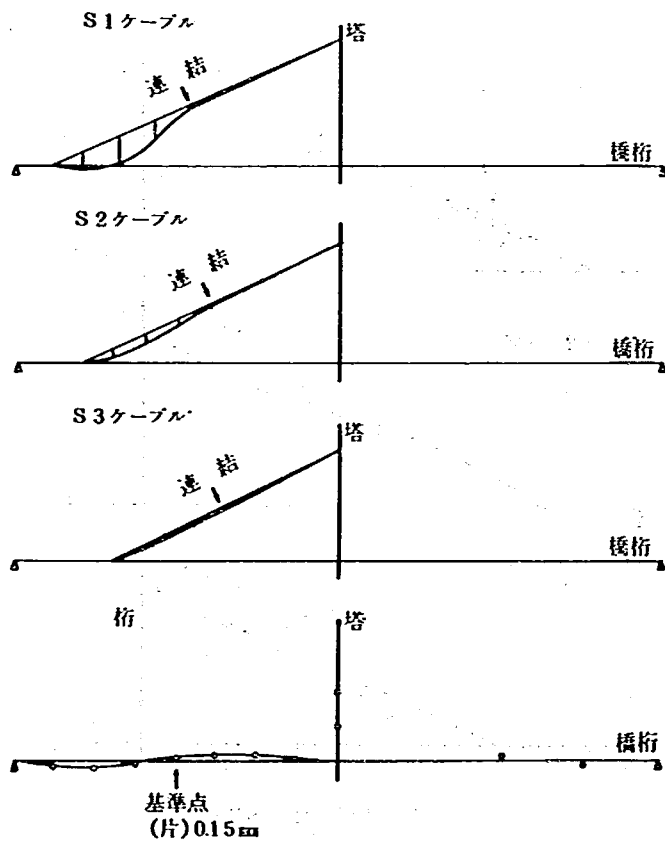
(a) $f = 9.75\text{Hz}$



(b) $f = 12.00\text{Hz}$ (S1-1)



(c) $f = 13.50\text{Hz}$ (S2-1)



(d) 桁を 11.37Hz で加振した場合

図-9.3 基本模型 c (実験ケース 8)

(注意) 1. S1ケーブル基準点に対する比。
2. ケーブルより上側が基準点と同位相。

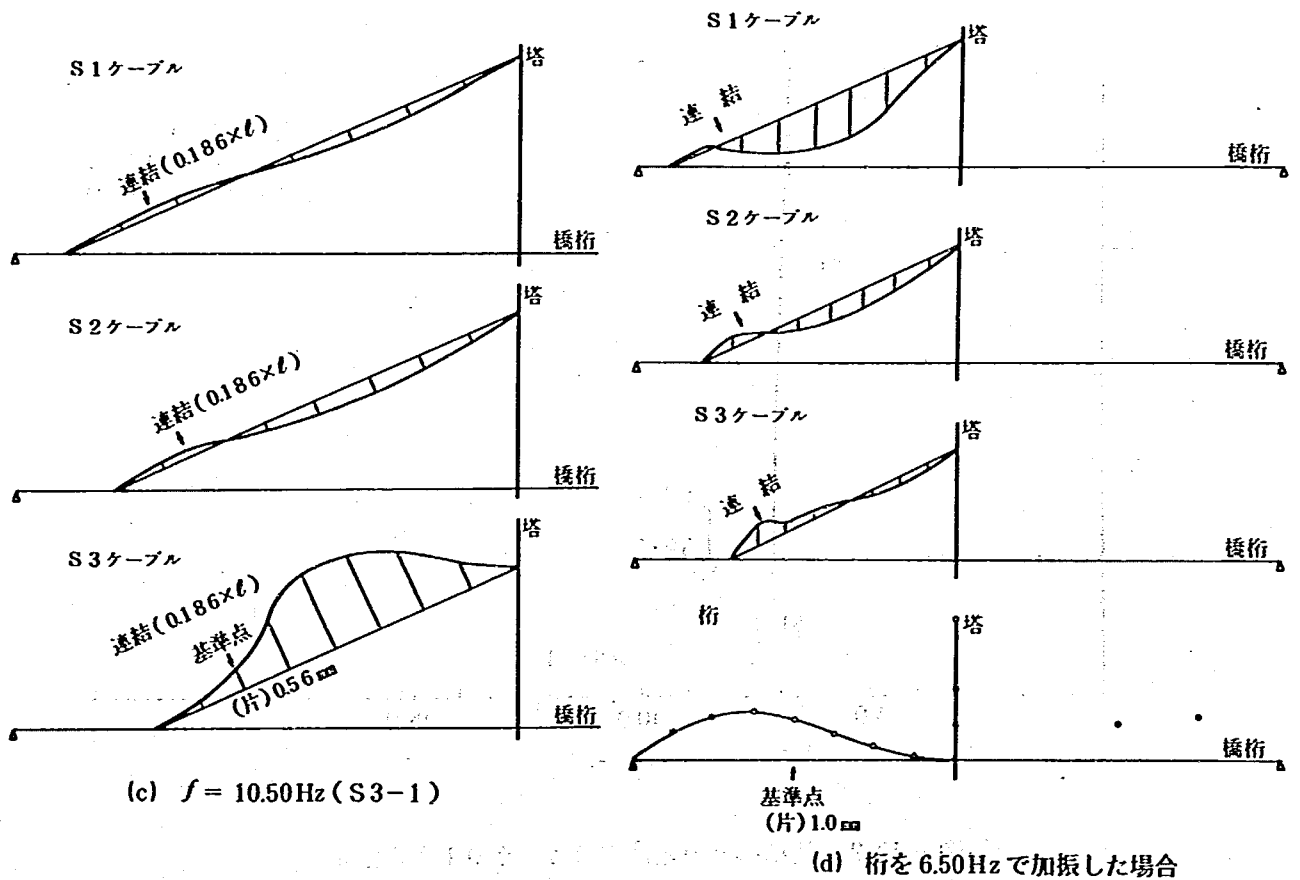
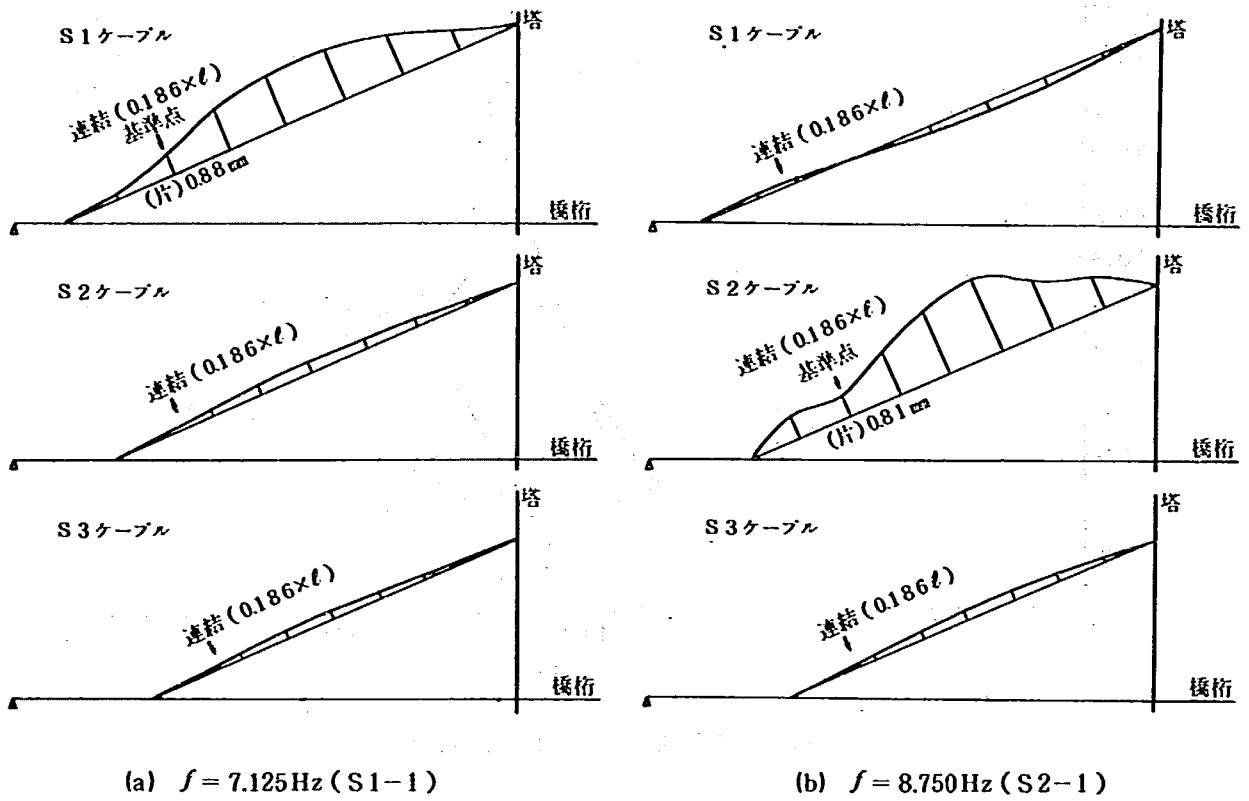


図-9.4 基本模型 d (実験ケース 9)

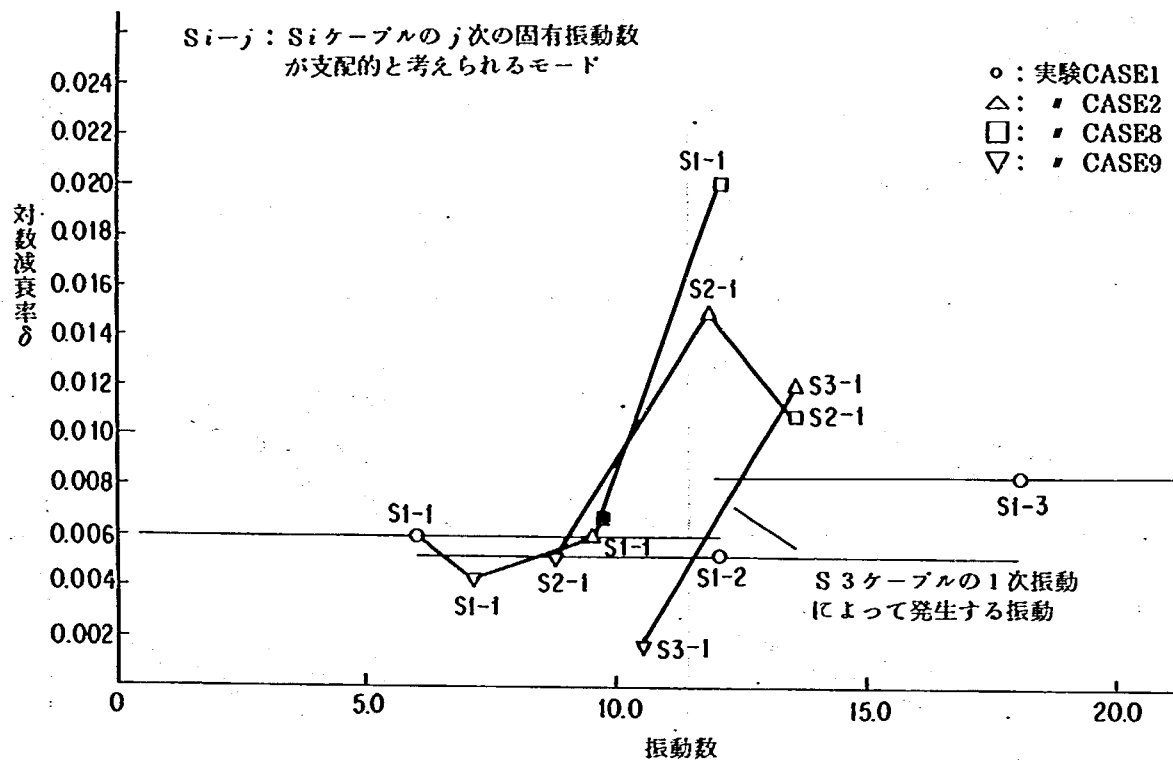


図-10.1 剛な連結による構造減衰の変化

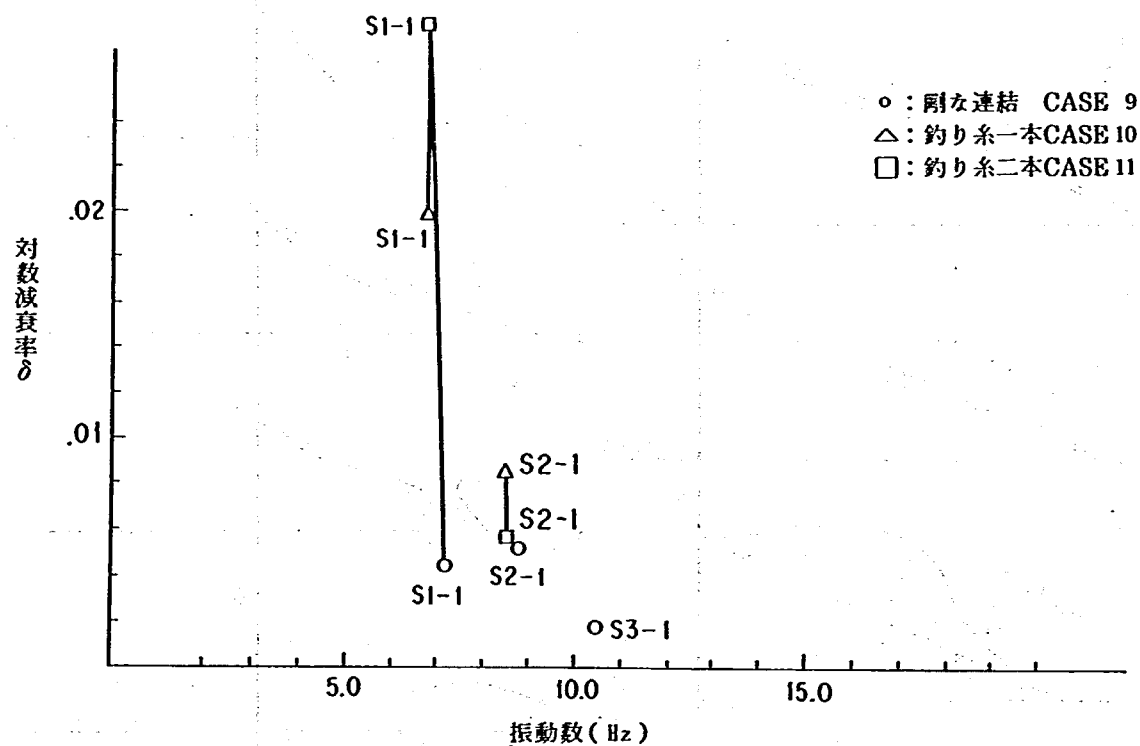


図-10.2 連結部材の剛性の影響 その1 (連結 a)

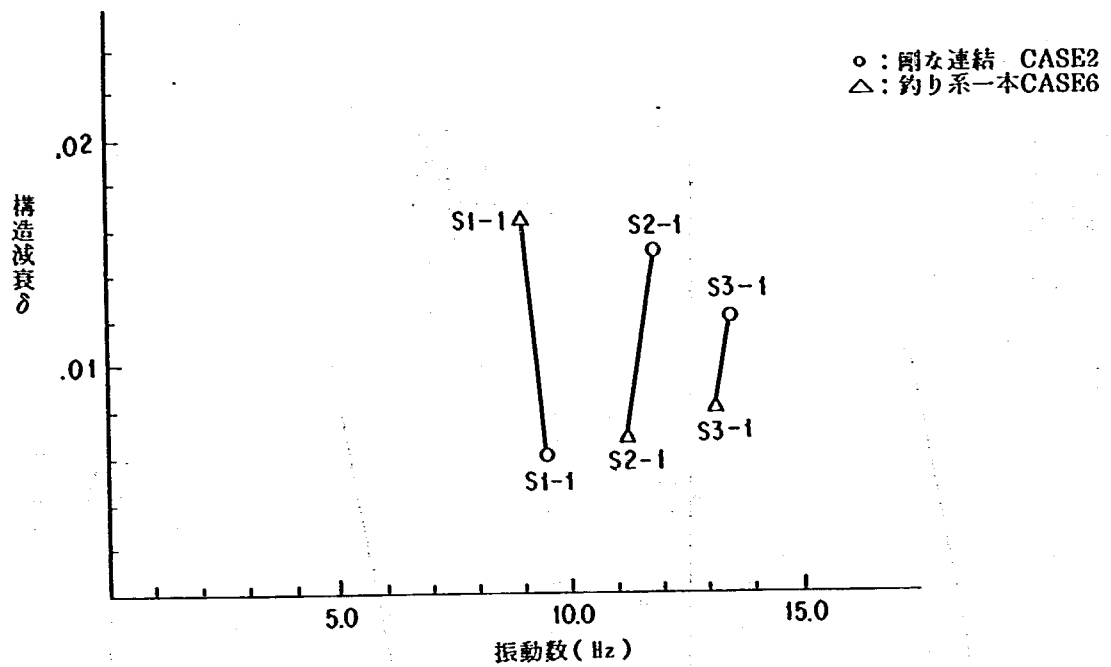


図-10.3 連結部材の剛性の影響 その2 (連結b)

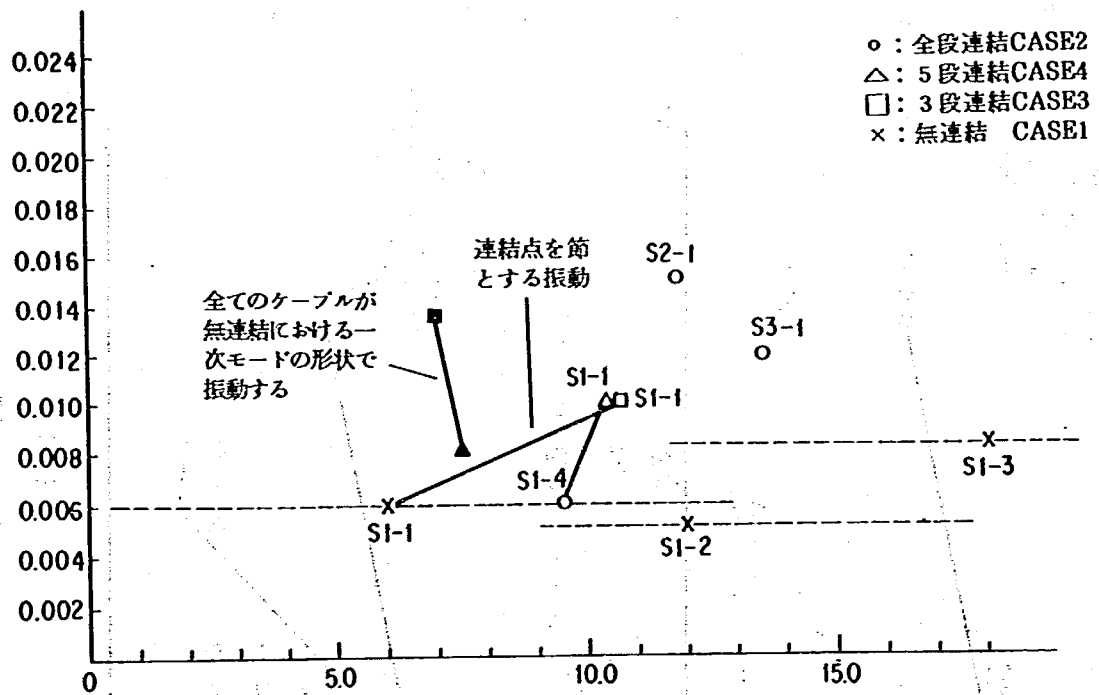
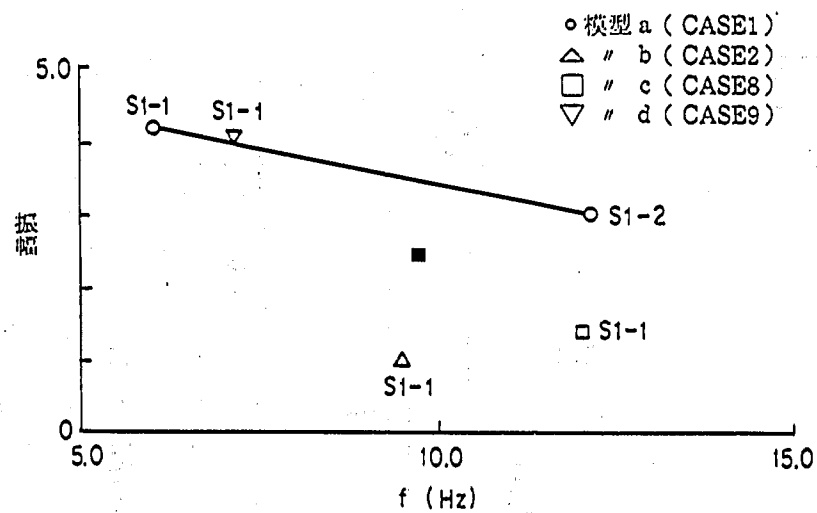
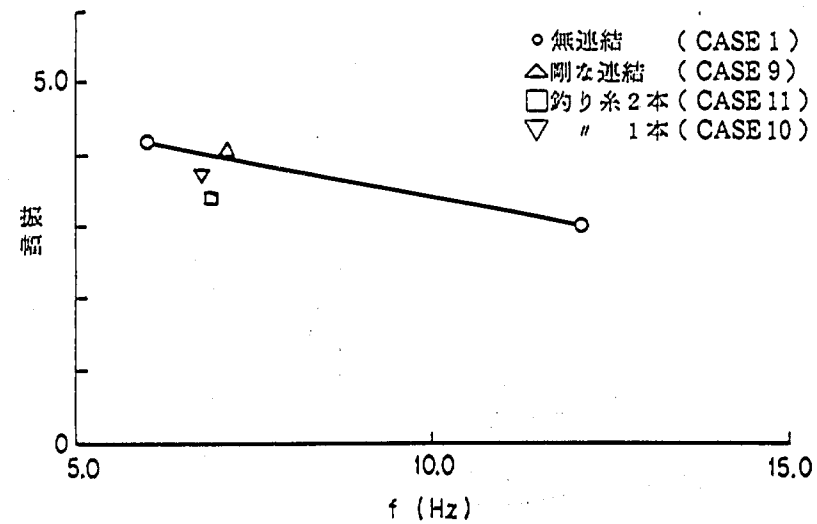


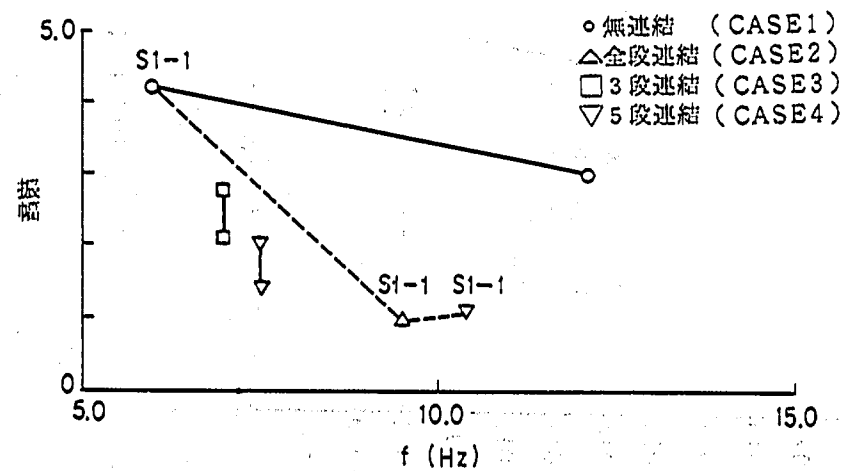
図-10.4 連結段数の相違の影響



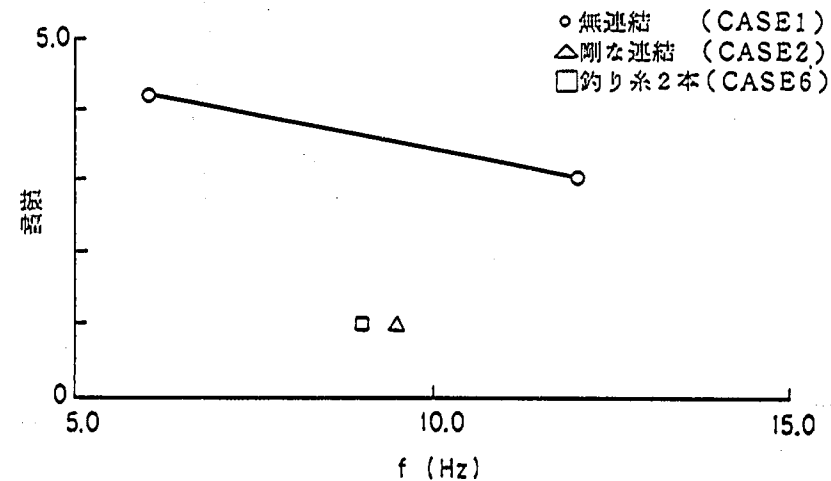
(a) ケーブルの連結位置と振幅



(c) 連結部材の剛性の変化(その1), 連結位置(d)



(b) 連結段数



(d) 連結部材の剛性の変化(その2), 連結位置(b)

図-11 振幅に対する連結の効果

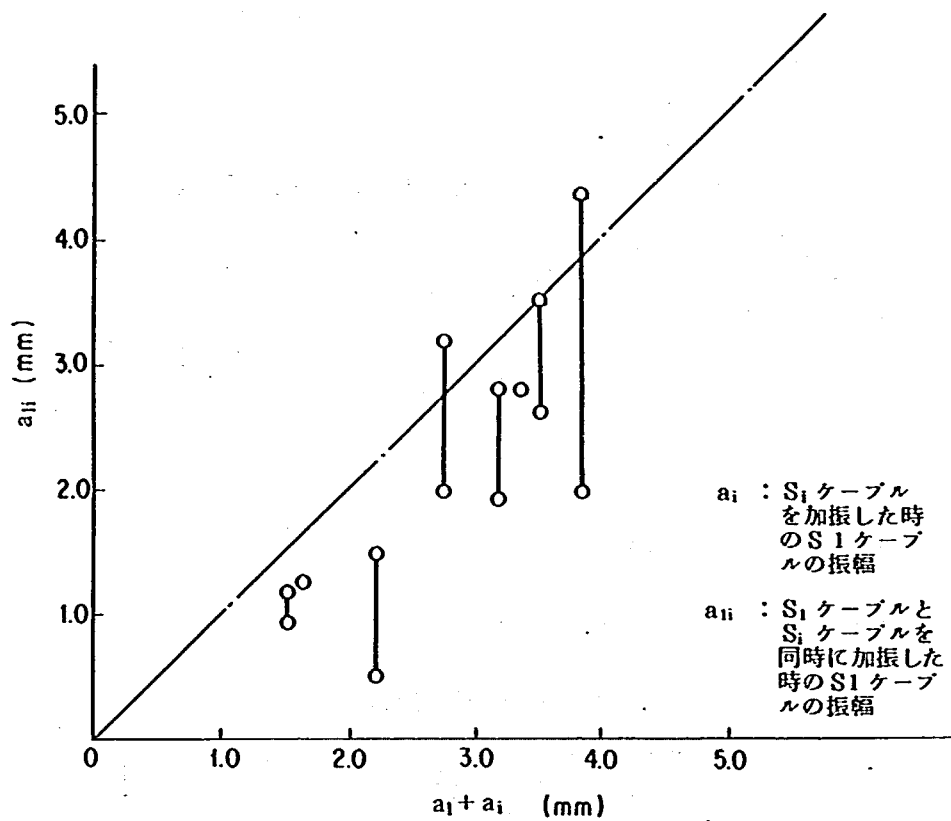


図-12 ケーブルの振幅の線形性

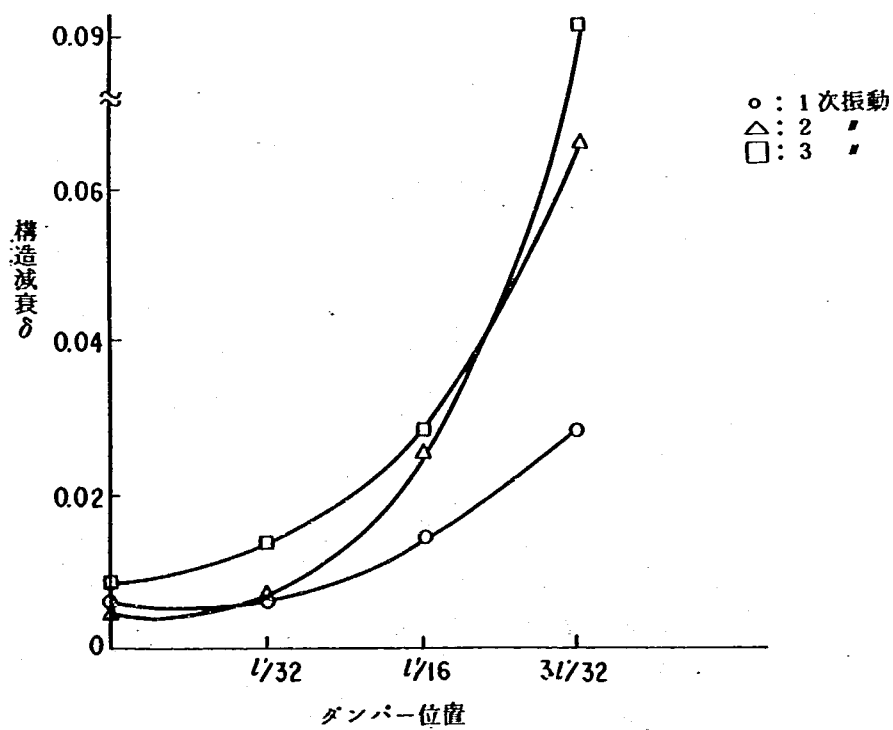


図-13 オイルダンパーの位置の効果

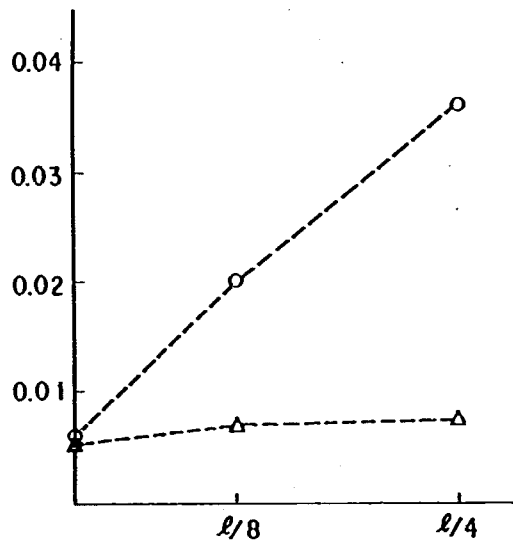


表-4 $l/16$ 点に設置したダンパーの効果

	1 次	2 次	3 次
オイルダンパー	0.0148	0.0259	0.0254
スポンジ支点	0.0316	0.0293	0.0190

図-14 スtockブリッジダンパーの効果

表-5 桁の構造の影響

桁の 構造減衰率	ケーブル独立モード			桁ケーブル 振 動
	1 次	2 次	3 次	
0.0083	0.0060	0.0052	0.0084	0.0088
0.0378	0.0055	0.0059	0.0079	0.0230

3. 制振方法の基礎的検討

3.1 羽地ダム湖水橋で検討すべき振動現象

斜張橋におけるケーブルの振動としては、そのメカニズムによって2つに分類される現象が一般的な斜張橋で問題となると考えられる。すなわち、一つはレインバイブレーションであり、他方はウェークギャロッピングである。

レインバイブレーションは、降雨時にのみ発生する振動であり、これまでの研究から、ケーブル上を流れ落ちる雨水の形成する水路（リブレット）が発生の要因となっているものと考えられる現象である。このような振動現象は名洗西大橋において注目されるところとなった。その後荒津大橋及び安治川橋梁においてかなり大きな振幅でこの現象が観測された。

一方のウェークギャロッピングは、ウェーク（物体の後流）が引き起こす現象であり、斜張橋では並列ケーブルを有する場合に、風上側のケーブルのウェークが風下側のケーブルを振動させる。このような振動現象は檜石島・岩黒島橋で発生し、さらにPC斜張橋の呼子大橋や布施田浦橋でも観測されている。

羽地ダム湖水橋は通常のPE管被覆を有するケーブルを有する予定であるが、並列ケーブルは有しない。従って、本橋ではレインバイブレーションを対象として制振対策を検討すれば十分であると考えられる。

3.2 レインバイブレーションの特性

羽地ダム湖水橋では、レインバイブレーションが問題となる。そこで現在までの調査で明らかとなったレインバイブレーションの特性を以下にまとめる^{1)~3)}。

- イ. レインバイブレーションの発現風速は振動数の影響を受けないが、振幅は振動数が増大するに従い小さくなる。
- ロ. レインバイブレーションは工学的には適当な雨量及び風速でリブレットが適当な位置に発生することによって発現する振動と捉えて問題はない。
- ハ. レインバイブレーションは対数減衰率 δ で約0.02程度付加すると発現しなくなる。
- ニ. レインバイブレーションは、乱れによって低減される可能性があるがまだ定量的には評価できない。

3.3 制振対策

1次から4次モード程度の振動において減衰を0.02以上付加することができれば、制振が可能と考えられる。したがって構造力学的対策としては0.02を目安とし、これにある程度の安全性を考慮した付加的構造減衰が得られることを計算あるいは実験で確認すれば特に問題は生じないと考えられる。

今回の模型実験はケーブルの相互連結の制振効果を明らかにすることが目的であったが、構造減衰に関しては、傾向が捉えきれなかった。一方オイルダンパーやストックブリッジダンパーは、その効果が明確で、ケーブルの振動を独立に扱えるためレインバイブレーションの対策として有効である。例えば荒津大橋では昭和63年度の検討で数値解析によってダンパーの最適な位置を決定し、実験によってその効果が確

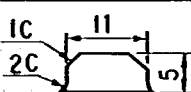
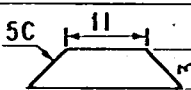
められている。

また空気力学的対策として、図-15に示す平行突起を取り付ける方法が、阪神高速道路公団によるかなり詳細な風洞実験によって確められている。しかしこの方法に関しては、平行突起の取り付けられたPE管の製作方法や耐久性について検討課題が残されている。

したがって羽地ダム湖水橋ではこのような実績と、景観や維持・管理を考慮して、ダンパーの種類や設置方法を検討し、さらにケーブルの連結や空力的な対策に関しても今後の検討成果を取入れて最終的に方法を決定するのが良いと考えられる。

なお、レインバイブレーションはその特性からPE管を有するマルチケーブルの斜張橋では十分に起こる可能性があるが、乱れの影響や未知の要因によって、必ず発現すると判断することは今の所できない。また、架設時にケーブル振動に十分に注意していれば、ケーブル振動が直ちにケーブルに損傷を与えるものとはならないと考えられる。したがって架設時の仮制振として麻ロープによって橋桁を連結することとし、実橋での制振装置の製作と設置は実橋での振動の有無を確認してから行えば十分と考えられる。

平行突起型模型寸法

対策	H(mm)	W(mm)	θ 度	C_1 (mm)	C_2 (mm)	形状
A	5	11	30	2	1	
B	5	11	30	5	0	

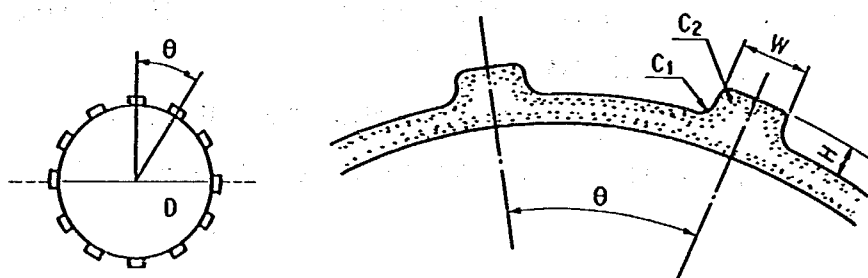


図-15 平行突起

4. ま と め

本実験から得られた成果を以下に列挙する。

(1) ケーブルの連結に関して

- ① 連結によって構造減衰は必ずしも向上しない。
- ② 連結部材の性質によって構造減衰率が変化し、連結部材がダンパーとなっている可能性がある。
- ③ 連結位置が適当な場合、1つのケーブルに加わる加振力が他のケーブルをも振動させるため、同じ加振力によっても振幅は小さくなる。しかし振動モードの腹を相互に結んだ場合やケーブルの端部付近を連結した場合にはこの効果は弱まる。

④ 連結によって振動数は一般的に向上するため、連結位置によってはレインバイブレーションにおいては振幅が小さくなるような効果を発揮すると思われる。

⑤ 連結によってケーブルは振動数の近い数多くの振動モードで振動するようになり、非連結時にそれぞれが独立な弦に近い振動だけを発生させていたのと大きく様相が変化する。

⑥ 連結後のケーブルの振動は他のケーブルの特性の影響を大きく受けるため、マルチケーブルの斜張橋においては、規則付けや因子の分離はかなり難しい。

(2) ダンパーの効果について

① ダンパーの位置や強さの影響は振動モードによって異なり、不適当にこれらを選択すると、ダンパーの設置位置が節となり減衰率が向上しないことがある。従ってダンパーの性能および設置方法は、数値計算や実験によって検討する必要がある。

なお、今回の検討ばかりでなく、数値計算と模型実験結果を比較してケーブルの連結効果を明らかにし、羽地ダム湖水橋に最適なケーブル連結方法を提出することが今後の課題として挙げられる。

謝 辞

本調査を実施するに当たり、沖縄開発庁北部ダム事務所の方々より多くの協力を得たことをここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Y. Hikami, N. Shiraishi ; RAIN-WIND INDUCED VIBRATIONS OF CABLE STAYED BRIDGES, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 29(1988).
- 2) 松本勝, 白石成人, 北沢正彦他 ; 風雨条件下のケーブル振動現象に関する考察, 第10回風工学シンポジウム (1988).
- 3) T. Yoshimura, T. Tanaka : RAIN-WIND INDUCED VIBRATION OF THE CABLES OF THE ARATU BRIDGE, PROCEEDINGS OF 10TH NATIONAL SYMPOSIUM ON WIND ENGINEERING, 1988.

羽地ダム湖水橋のケーブル
制振に関する実験報告書

ISSN 0386-5878
土木研究所資料 第2763号
平成元年2月(1989年)

横山功一・日下部毅明・伊関英彦

要 旨

沖縄県名護市に建設が予定されている2径間PC斜張橋羽地ダム湖水橋の風によるケーブルの振動に関連し、ケーブルの相互連結や各種ダンパー等のケーブル制振装置の基礎的な検討を行った。その結果ケーブルの連結に関しては、その制振効果には構造減衰だけでは評価できない様々な要因があり、検討を深める必要があること、ダンパーの効果についてはレインバイブレーションに十分な効果があるものの、数値計算や実験によってダンパーの性能および設置方法を最適にする必要性が大きいことが明らかとなった。

キーワード：PC斜張橋、レインバイブレーション、ケーブル相互連結、
加振実験、ダンパー

郵便はがき

305-□□

41円切手
をはいて
下さい

建設省土木研究所

構造研究室 御中

茨城県つくば市大字旭一番地

No. 22

No. 22

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属(住所)

氏 名 印

土木研究所資料第2763号

