

土木研究所資料

斜張橋の耐震性に関する研究

——(その5)ケーブル形式が斜張橋の減衰定数に及ぼす影響
に関する自由振動実験——

Seismic Design Procedure of Cable-Stayed Bridges
——Part 5. Free Oscillation Test of A Model Bridge
for Evaluating Effects of Cable Configuration
on Damping Characteristics of Cable-Stayed Bridges——

昭和63年7月

建設省土木研究所
地震防災部耐震研究室

Copyright © (1988) 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、土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

斜張橋の耐震性に関する研究

——(その5)ケーブル形式が斜張橋の減衰定数に及ぼす影響
に関する自由振動実験——

耐震研究室	室長	川島一彦
	研究員	運上茂樹
	部外研究員	久保明英
	部外研究員	角本周
		吾田洋一

要 旨

近年、長大スパンの斜張橋の採用事例が急増している。これは、斜張橋が従来の吊橋と連続桁橋の中間の特性を有し、吊橋のように巨大なアンカー基礎を必要とせず、軟質な地盤上に建設される長大橋として構造的に適しているとともに橋梁技術の進歩に伴い、長大スパン化が可能となったためである。しかしながら、斜張橋に対しては、従来震害経験がなく、また強震観測等による動的特性の把握も十分でないのが実情である。

本報告は、模型自由振動実験により、ケーブル形式及びケーブル段数の違いによる斜張橋の減衰特性を検討した結果をとりまとめたものである。

キーワード：斜張橋，自由振動実験，減衰特性

目 次

1. 概 要	1
2. 実験模型の諸元	3
3. 実 験 概 要	6
3.1 実験ケース	6
3.2 実験手法	9
4. 固有振動解析	11
4.1 解析モデル	11
4.2 振子運動による復元力のモデル化	16
4.3 幾何剛性	18
4.4 固有振動解析結果	22
5. 実 験 結 果	32
5.1 実験結果の処理	32
5.2 自由振動波形及び減衰定数	33
6. 斜張橋の減衰特性	52
7. 結 論	57
参 考 文 献	58
付 属 資 料	59

1. 概 要

近年、大規模特殊事業関連の道路において、長大スパンの斜張橋が採用される事例が急増している。これは、斜張橋が軟質な地盤上に建設される中長大橋として構造的に適しているとともに橋梁技術の進歩に伴い、長大スパン化が可能となったためである。

斜張橋は、構造的に従来の吊橋と連続桁橋の中間の特性を有するものであり、構造的には、吊桁を主塔を介して張られた斜めケーブルで吊り、補剛するといういわゆる自定式構造であり、大きな水平力を下部構造に伝えることはなく、吊橋のような巨大なアンカー基礎を必要としないために軟弱地盤に建設されることが多くなっている。

しかしながら、斜張橋に対しては従来震害経験がなく、また強震観測等による動的特性の把握も十分でないのが実情であり、早急に斜張橋の動的特性を取り入れた耐震設計法の開発が必要とされている。

既往の斜張橋の実橋振動実験結果によれば、固有振動数、固有振動モードは、離散系骨組構造解析モデルによる固有振動解析結果と良く一致しており¹⁾ 現有の手法により求めた固有振動数及び固有振動モードは、斜張橋の実際の固有振動特性をかなり良く表現するといえる。しかしながら、動的解析には、一般に上部構造系に対しては2～5%、下部構造系に対しては5%程度の減衰定数が仮定される例が多いが、既往の微小振動時の実橋実験結果による上部構造系の減衰定数は一般にこれよりもかなり小さな値が得られる場合が多い。減衰定数による斜張橋の振動応答は、減衰定数の小さな所で敏感に変化するため²⁾³⁾、耐震設計上減衰定数を正しく求めることが重要である。

減衰特性は下部工への作用力を含めて全体系の地震応答に最も大きな影響を及ぼすものでありながら、現在までに十分な検討が行なわれていない項目である。これは橋梁の減衰特性の理論的取り扱い、材料のみの減衰、あるいは摩擦力による減衰⁴⁾等の個々の要因に限られ、構造物全体としての定量的評価は、振動実験結果の蓄積による以外は難しい現状にあるためである。これは構造物全体としての減衰特性には、材料、接合方法、支持方法、橋梁規模、振動形、空気抵抗の度合などの種々の要因が複雑に関係してくるためである。

構造物の減衰性については、通常次のように大別して考えることができる⁵⁾⁶⁾。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{構造材料の減衰} \\ \text{構造系の減衰} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{構造系内でのエネルギー消散} \\ \text{構造系外部へのエネルギー逸散} \end{array} \right.$$

構造材料の減衰とは、材料自身の内部摩擦によるものである。また、構造系内でのエネルギーの消散としては、継手部や支承部などにおける摩擦を、また構造系外部へのエネルギーの逸散としては、橋脚基礎を通して基礎地盤へのエネルギー逸散⁷⁾による他、空気抵抗による減衰などが挙げられる。また、斜張橋特有の減衰にシステムダンピングの存在が指摘されている。これは、

ケーブルのサグの変化による非線形性や異なる周期を有するケーブルの弦としての横振動の干渉による減衰性によるものである⁸⁾。

以上のような種々の減衰をそのまま取り扱うことは、計算の煩雑さ等から難しく、計算上無視されるかあるいは等価な粘性減衰定数に置き換えて、上記の粘性減衰定数2～5%の中に、その他の減衰効果も含め、大まかな工学的判断をもって設定されている。

斜張橋は、主桁、塔の形状、支持形式、ケーブルの配置等、設計自由度も多く多様な構造系を作り出すことが可能である。構造系が異なるとその減衰の支配的要因も異なってくるため、与えられた条件下で減衰定数を正しく推定できる手法を開発することが必要とされている。

このため、斜張橋の減衰がケーブル形式及び段数によってどのように変化するか、そしてその支配要因は何であることを調査する目的で模型振動実験を実施した⁹⁾¹⁰⁾。本報告は、その結果をとりまとめたものである。

2. 実験模型の諸元

模型の全体形状を図 2.1, 写真 2.1 に示す。模型の形状寸法は名港西大橋を参考とし, 長さの相似比を 1/150 として断面諸元を定めた¹¹⁾。ただし, 模型のバランスを考慮して, 中央径間/全長比を多少小さくしている。また, 計測器具から受ける反力, 空気抵抗及びケーブル張力の不均衡の影響を小さくすると同時に, 計測上の理由から橋軸及び鉛直方向の一次固有振動数が 5 Hz 以下となるようにするために, 主桁重量を大きくしている。

主桁構造を写真 2.2 に示す。主桁模型の骨組(以下剛性棒と呼ぶ)には, 幅 12.7 mm × 厚さ 3.0 mm の鋼材(SS 41)を用い, 中心線に沿って規則的に $\phi 1.7$ mm のビス孔を点孔した。主桁横組は, 上下 2 枚の帯鋼及び鋼製つなぎ材から成り, 下側帯鋼には主桁中心線より 50 cm の位置にケーブル定着用の $\phi 1.0$ mm の孔を設置した。鉛製重り(85.0 g)は下側帯鋼下部にビス止め固定した。

主塔は 5.0 mm × 5.0 mm の鋼材(SS 41) 2 本より成り, 中心間隔 100 mm で鋼製支持台に固定し, 頂部および中間部の 1 ケ所に横桁を配して平行門型塔とした。主塔側のケーブル定着装置を写真 2.3 に示す。ケーブルは燐青銅板バネの孔を通して定着される。燐青銅板の厚さ, およびケーブル定着孔の位置を変えることによりケーブルの伸び剛性を調整することができるが, 今回の実験では板厚を 1.2 mm とし, ケーブル定着孔の位置は最上段のケーブルに対して 1 番外側の孔を, その他のケーブルに対しては外側より 2 段目の孔を用いた。主塔側のケーブル定着装置は, フェン形式およびハープ形式に応じて, 2 つのタイプに配置した。

ケーブルは $\phi 0.5$ mm のピアノ線を用いて平行 2 面吊りとした。写真 2.2 および写真 2.3 にそれぞれ主桁側および主塔側のケーブル定着具を示す。主桁側定着具はケーブル有効長を 5 mm 程度変化できる構造としている。

なお, 付属資料に実験模型の詳細図を示す。

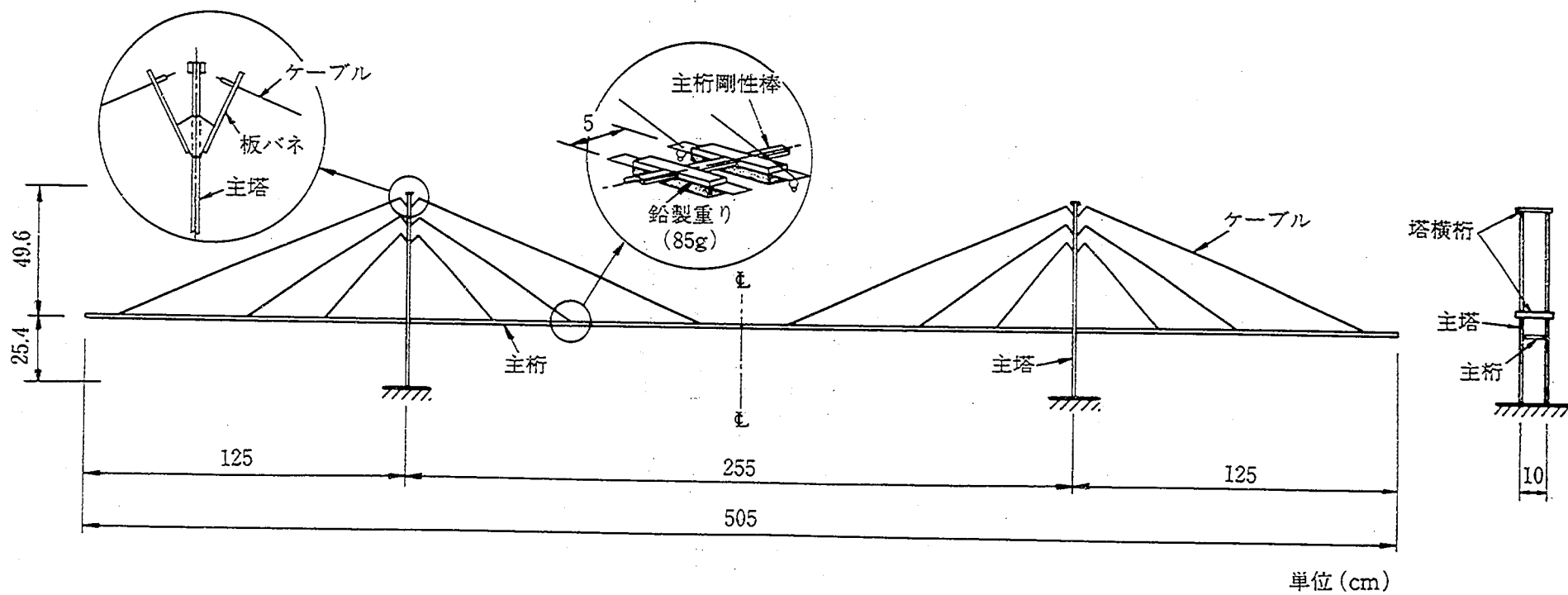


図 2.1 実 験 模 型 全 体 形 状

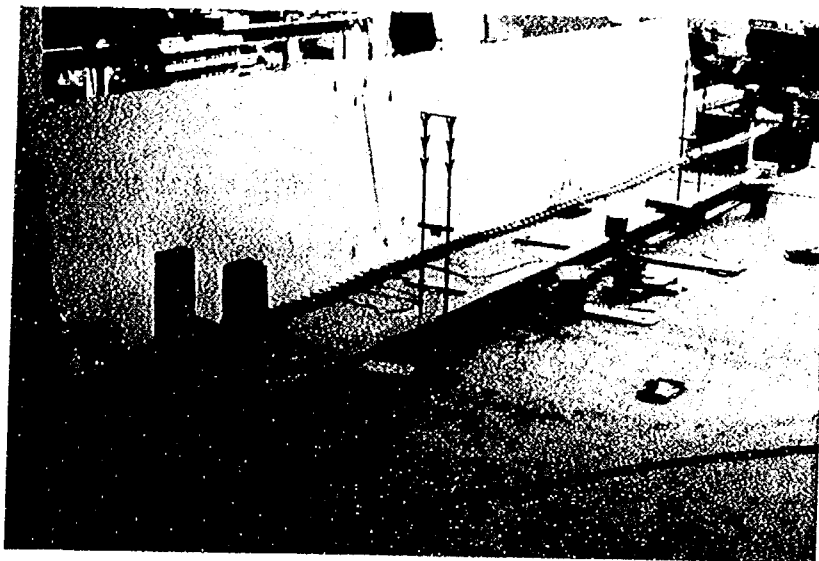


写真 2.1 実 験 模 型

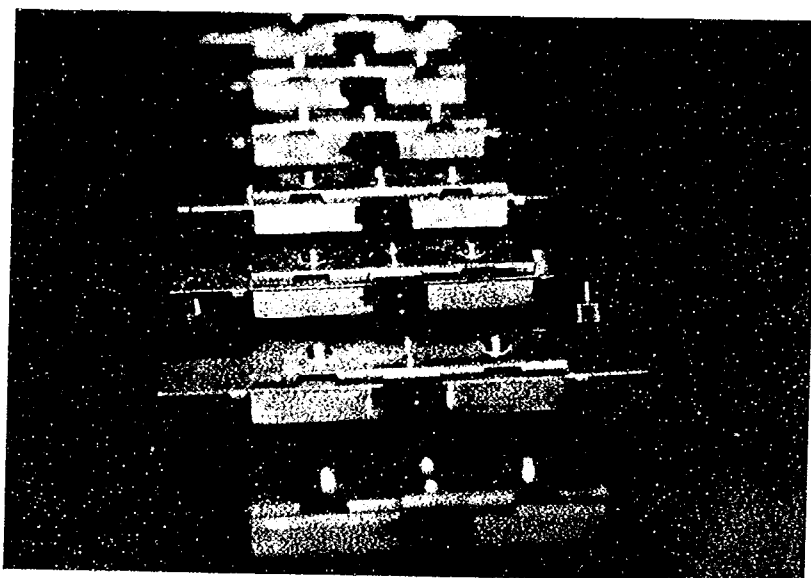


写真 2.2 主桁部における横組及びケーブルの取付状況

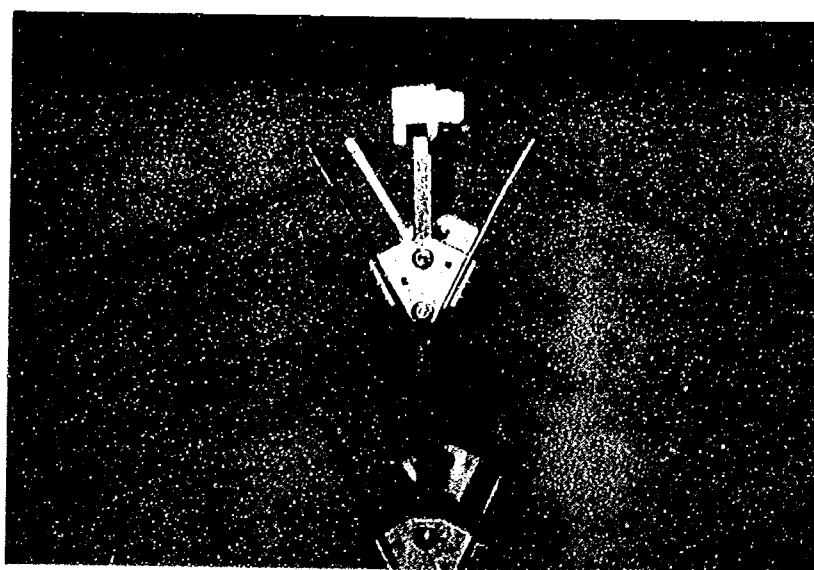
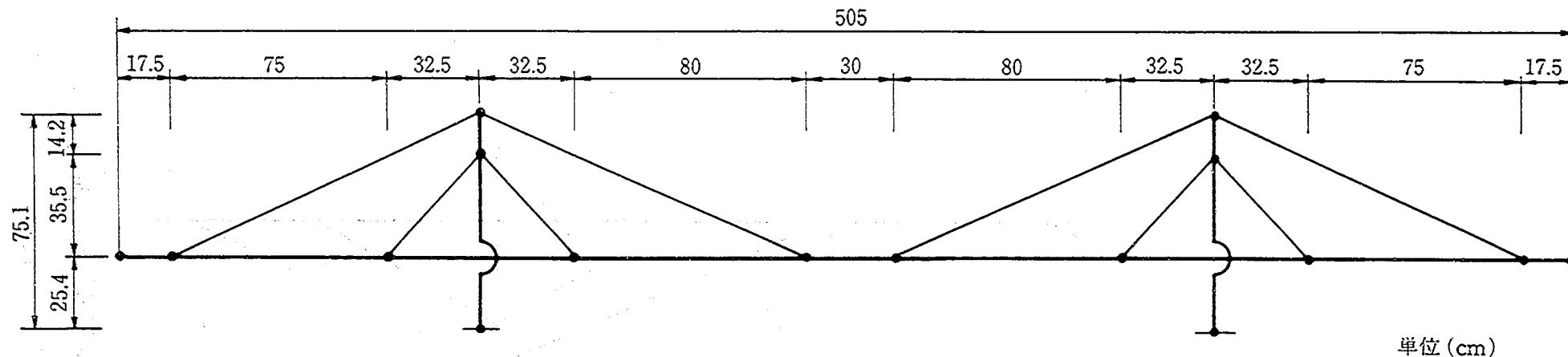


写真 2.3 主塔頂部およびケーブル定着装置

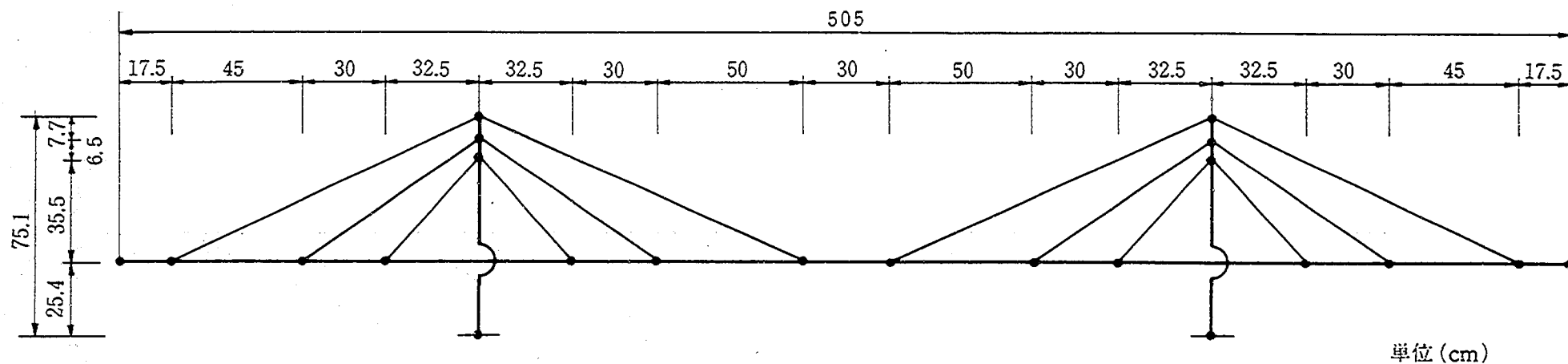
3. 実 験 概 要

3.1 実験ケース

支承等による減衰の影響を受けないように、主桁の桁端部および主塔位置での支持をフリー（以下、オールフリー形式と呼ぶ）として実験を行った。ケーブル張形式およびケーブル本数の減衰特性に与える影響を着目する為に、実験ケースとしてはファン形式2段張及び3段張、ハープ形式2段張及び3段張の4ケースを設定した。図3.1に各実験ケースのケーブル張形式を示す。

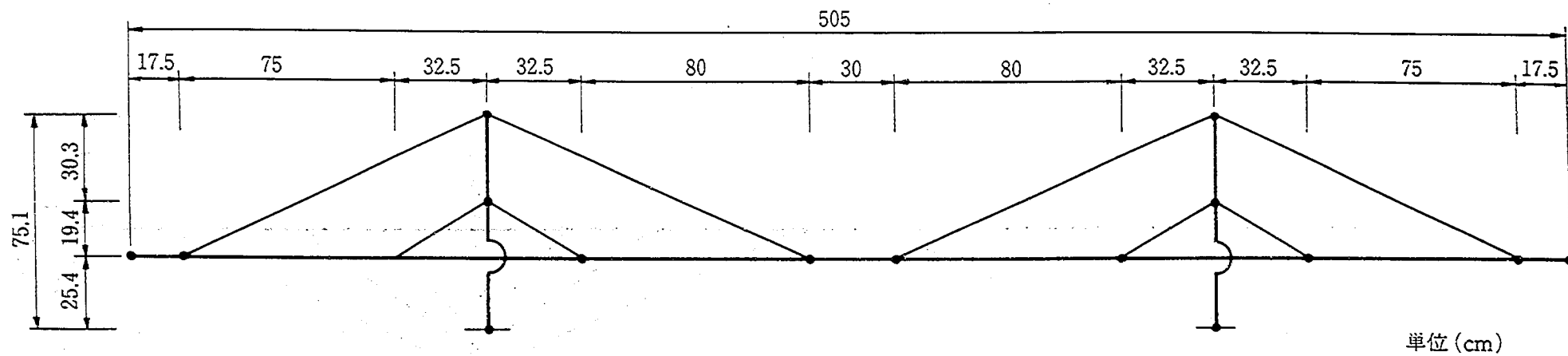


(a) ファン形式 2 段張 ケース

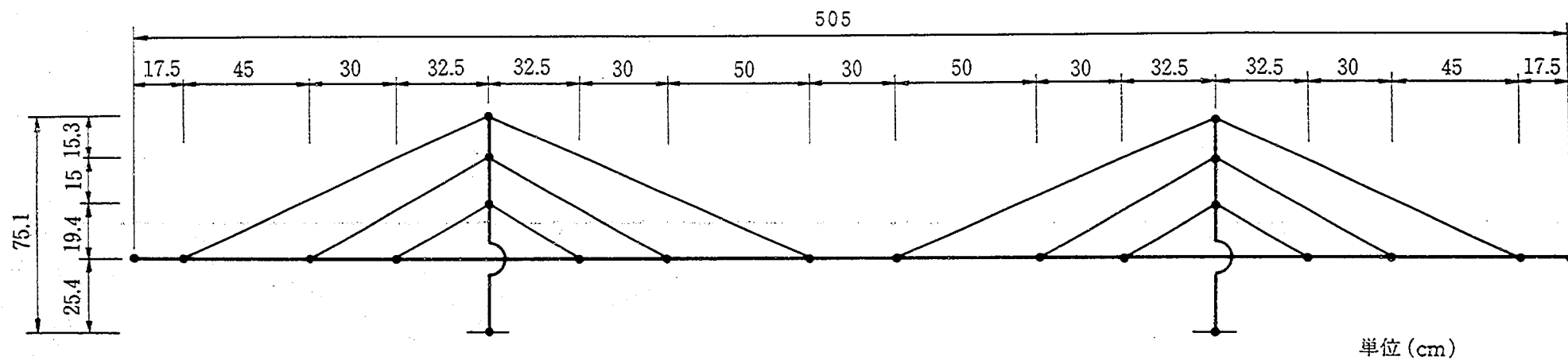


(b) ファン形式 3 段張 ケース

図 3.1 実 験 ケ ー ス



(c) ハープ形式 2 段張ケース



(d) ハープ形式 3 段張ケース

図 3.1 実験 ケース

3.2 実験手法

橋軸方向および鉛直方向の2方向に加振し、自由減衰振動を計測した。計測には150 mm×150 mmのアルミ板を被測定体(導電体)として模型の変位計測位置に取り付け、写真3.1に示すうず電流式非接触変位計を用いて行った。図3.2に変位計測位置および計測方向を示す。また、写真3.1 a), b)にその状況を示す。

(1) 橋軸方向加振

主桁東側端部において主桁を橋軸方向に水平に20 mm程度引くか(東側加振), もしくは押すか(西側加振)して初期変位を与え、静かに放すことにより自由振動を生じさせた。

(2) 鉛直方向加振

主桁支間中央点において主桁を15 mm程度上側に引くか(上側加振), もしくは下側に押すか(下側加振)して初期変位を与え、静かに放すことにより自由振動を生じさせた。

図3.2に加振位置および方向を記す。

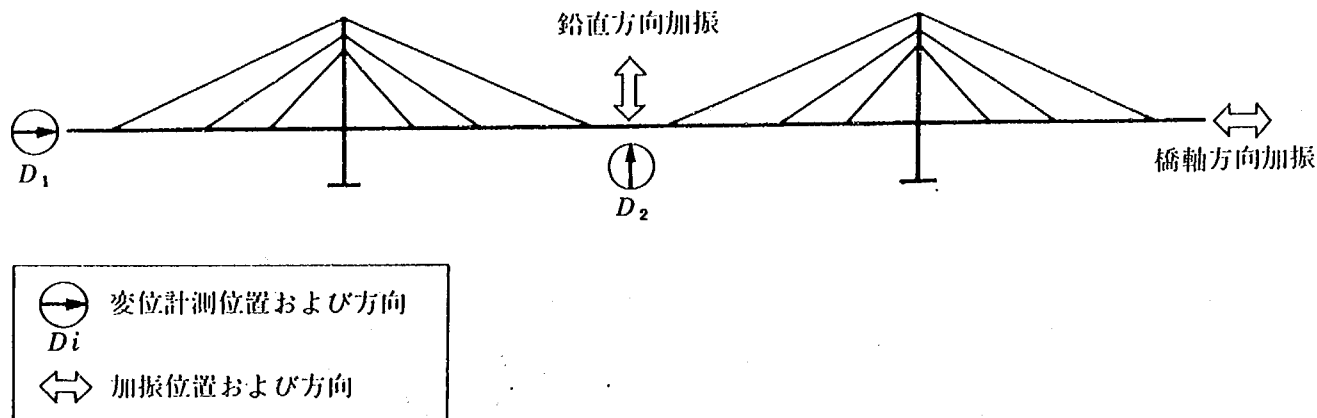
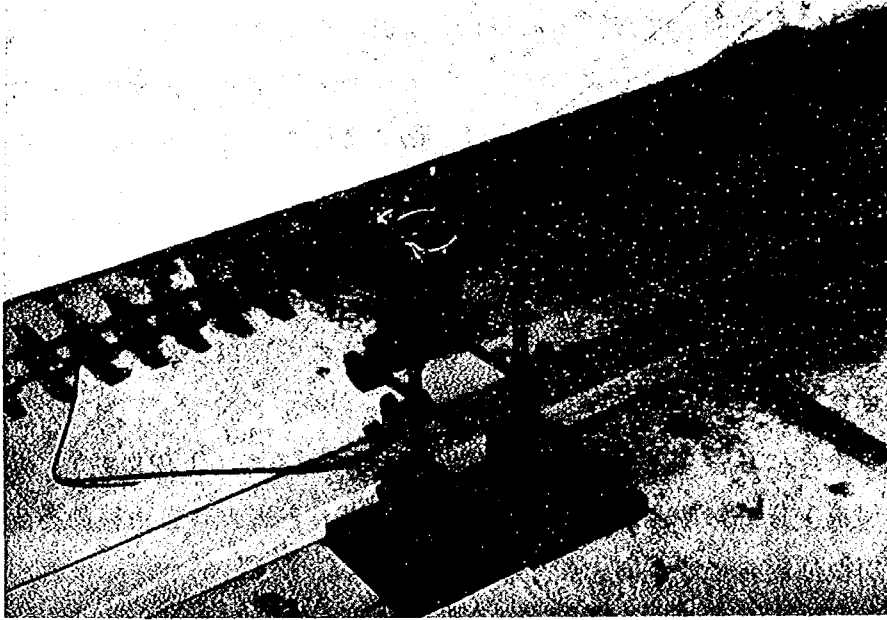
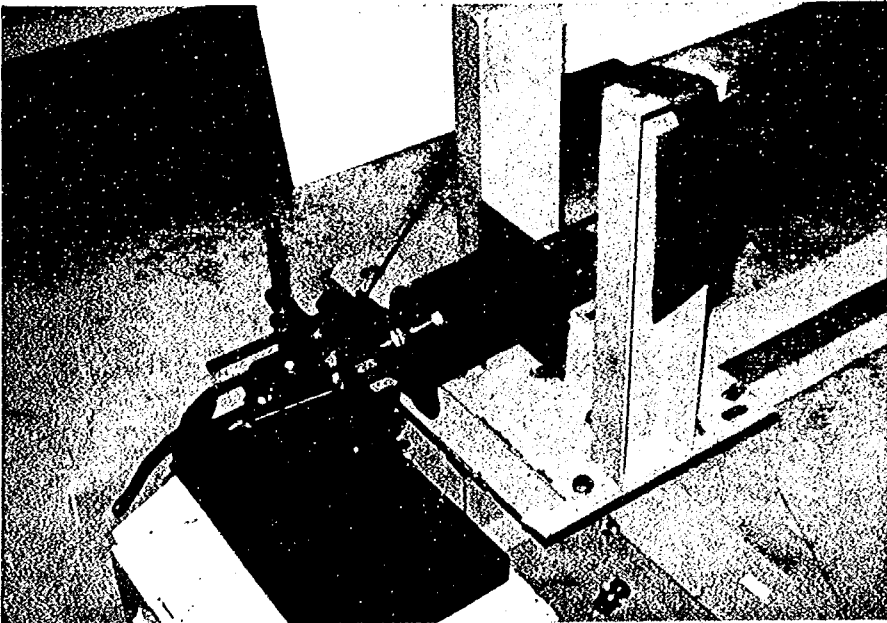


図3.2 自由振動実験における加振位置および変位計測位置



a) スパン中央（鉛直方向）の変位計測状況



b) 桁端（橋軸方向）の変位計測状況

写真 3.1 非接触変位計による変位計測状況

4. 固有振動解析

4.1 解析モデル

固有振動解析を、実験模型を離散系の線形骨組構造としてモデル化して行った。図 4.1 a) ~ d) に各ケースの解析モデルを示す。解析には 2 次元平面モデルを用い、橋軸および鉛直の 2 方向をそれぞれ解析対象方向とした。節点数はいずれのケースでも 49 節点としたが、部材数はケーブル 2 段張の場合には 54 (主桁 32, 主塔 14, ケーブル 8) 部材, 3 段張の場合には 58 (主桁 32, 主塔 14, ケーブル 12) 部材である。

表 4.1 に解析に用いた主桁, 主塔及びケーブルの剛性を示す。また表 4.2 に各節点の質量を示す。ここでケーブル剛性は主塔での取り付け位置の燐青銅板による軸剛性の変化を考慮して式 (4.1) より求めた。

$$A = \frac{L}{E_S \left(\frac{L'}{E_S A_S} + \frac{d^3 \cos^2 r}{3 E_R I_R} \right)} \quad (4.1)$$

ここで, A : 見かけのケーブル断面積

E_S : ケーブル断性係数 $= 2.1 \times 10^7 \text{ t/m}^2$

A_S : ケーブル断面積 $2 \times \phi 0.5 = 3.926 \times 10^{-7} \text{ m}^2$

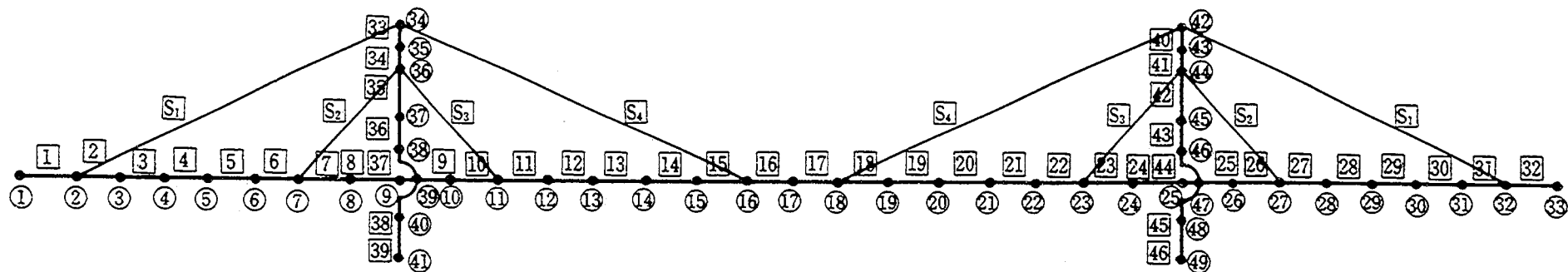
E_R : 燐青銅板弾性係数 $= 1.2 \times 10^7 \text{ t/m}^2$

I_R : 燐青銅板断面 2 次モーメント

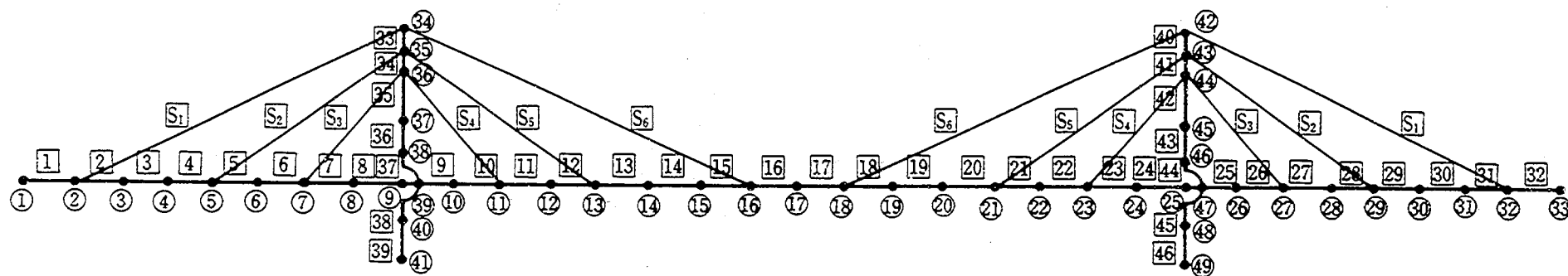
$(b \times h = 7 \times 1.2 \text{ mm}) = 1.008 \times 10^{-12} \text{ m}^4$

L, L', d, r : 図 4.2 参照

各ケーブルに対する見かけのケーブル断面積を表 4.3 に示す。ケーブルにより値が異なるが、解析においてはその平均値を基本に $1.2 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ とした。また、斜張橋のケーブルに関しては、サグの影響による非線形性による影響が指摘されているが、本検討においては、この非線形性は考慮しなかった。

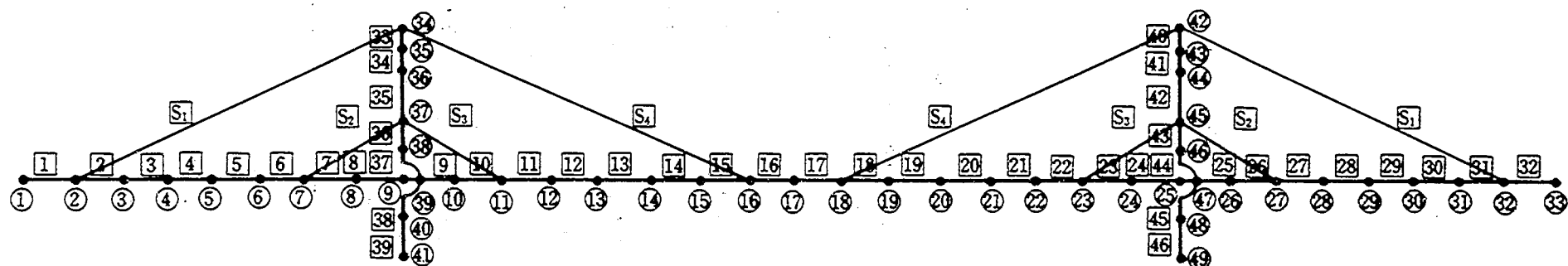


a) ファン形式 2 段張 ケース

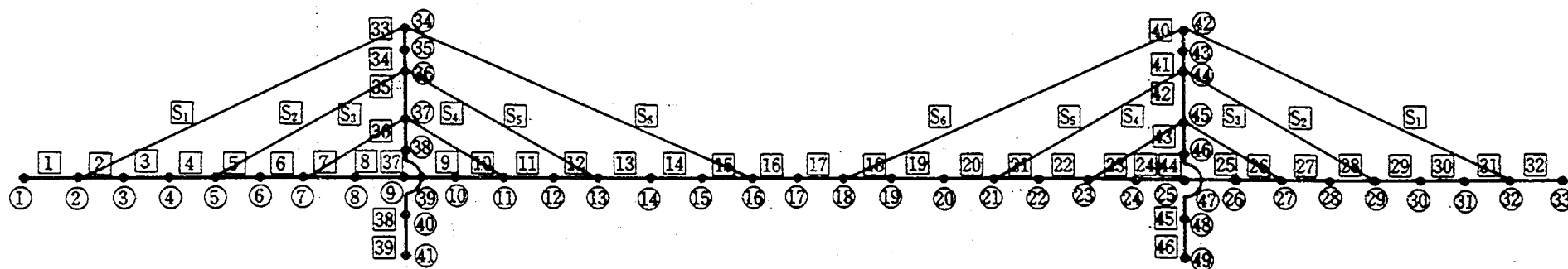


b) ファン形式 3 段張 ケース

図 4.1 解析モデル



c) ハープ状 2 段張 ケース



d) ハープ状 3 段張 ケース

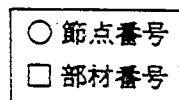


図 4.1 解析モデル

表 4.1 解析に用いた部材剛性

部 材	断面形状 $b \times h$ (mm)	弾性係数 (tf/m ²)	断 面 積 (m ²)	断面 2 次モー メント (m ⁴)	部 材 番 号
主 桁	12.7 × 3	2.1×10^7	3.810×10^{-5}	2.858×10^{-11}	[1] ~ [32]
主 塔	2 @ 5 × 5	2.1×10^7	5.000×10^{-5}	1.042×10^{-10}	[33] ~ [46]
ケ ー ブ ル	2 @ ϕ 0.5	2.1×10^7	1.200×10^{-7}	—	[S ₁] ~ [S ₄] : 2 段 [S ₁] ~ [S ₈] : 3 段

表 4.2 節 点 質 量

主 桁 部				主 塔 部		
節 点	質 量 ($\times 10^{-6}$ tf・s ² /m)	節 点	質 量 ($\times 10^{-6}$ tf・s ² /m)	節 点	質量 ($\times 10^{-6}$ tf・s ² /m)	
					フ ェ ン	ハ ー プ
① ③③	29.4	⑩ ②④	45.1	③④ ④②	9.6	9.6
② ③②	45.1	⑪ ②③	43.4	③⑤ ④③	7.6	3.1
③ ③①	41.6	⑫ ②②	41.6	③⑥ ④④	9.2	9.2
④ ③①		⑬ ②①	44.0	③⑦ ④⑤	5.7	10.2
⑤ ②⑨		⑭ ②①	46.3	③⑧ ④⑥	17.0	17.0
⑥ ②⑧		⑮ ①⑨		③⑨ ④⑦	4.0	4.0
⑦ ②⑦	43.4	⑯ ①⑧	44.0	④① ④⑧	5.1	5.1
⑧ ②⑥	45.1	⑰	41.6	④① ④⑨	—	—
⑨ ②⑤	50.2					

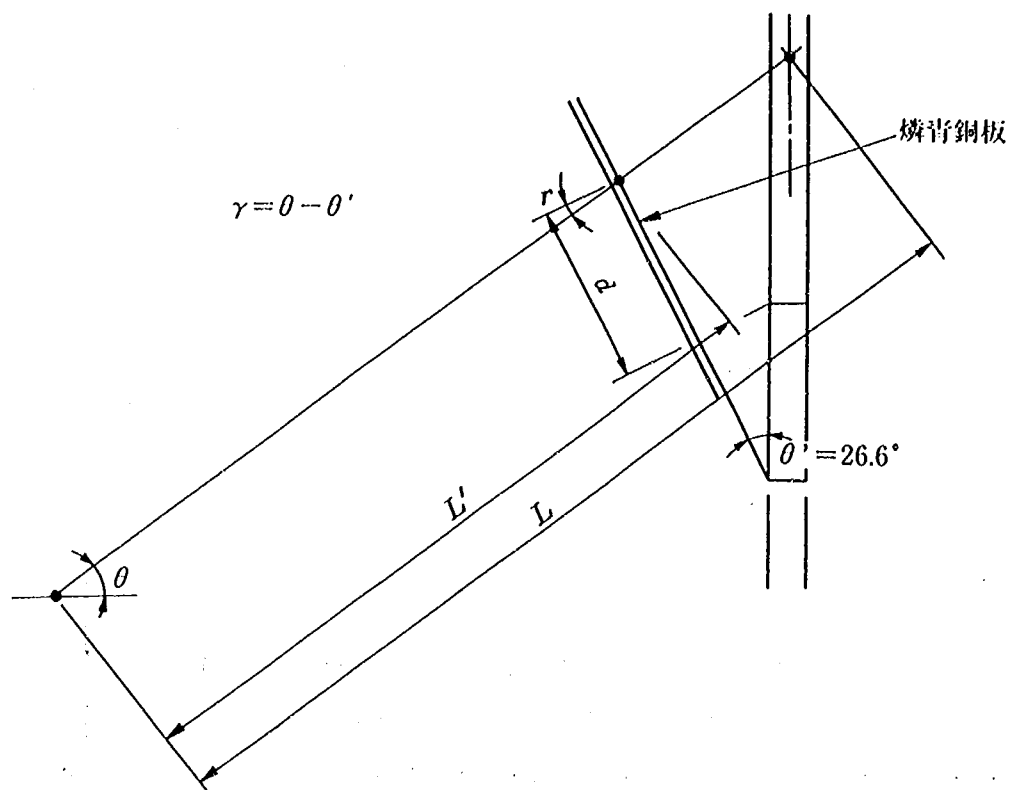


図 4.2 ケーブル剛性の補正

表 4.3 ケーブル剛性の補正

		L (m)	L' (m)	d (m)	θ (deg.)	r (deg.)	A (m ²)
ファン状	上 段	1.207	1.181	0.028	24.31	- 2.29	1.290×10^{-7}
	中 段	0.754	0.728	0.023	33.97	7.37	1.418×10^{-7}
	下 段	0.481	0.449	0.023	47.54	20.94	1.141×10^{-7}
ハープ状	上 段	1.207	1.181	0.028	24.31	- 2.29	1.290×10^{-7}
	中 段	0.713	0.688	0.023	28.78	2.18	1.353×10^{-7}
	下 段	0.378	0.353	0.023	30.89	4.29	0.859×10^{-7}
平 均 .							1.225×10^{-7}

4.2 振子運動による復元力のモデル化

今回の実験は、主桁端及び主塔位置において支承を用いず主桁の支持をフリーとしており、主桁はケーブルによってのみ支持されている。このような支持形式においては、構造の固有振動数はケーブルを弦とした主桁の振子運動の影響を受けることが指摘されている¹²⁾。従ってこの振子運動のモデルを解析に組み込む必要がある。以下に振子運動のモデル化を示す。

図 4.3 に示す系において、復元力 H は式 (4.2) で示される。

$$H = W \cdot \tan \theta = T \cdot \tan \theta \quad (4.2)$$

ここで、 T は静止状態での弦の張力である。 θ が微小な範囲では、 $\tan \theta \doteq \theta \doteq \sin \theta$ であるので、

$$H \doteq T \cdot \sin \theta = \frac{T}{\ell} \Delta \quad (4.3)$$

ゆえに、振子運動の復元力は、弦の初期張力 T 、弦の長さ ℓ 、弦の軸直角方向変位 Δ で示される。よって振子運動の復元剛性は図 4.4 に示すような振子の弦の両端の間に作用する水平ばねでモデル化される。その剛性マトリックスを式 (4.4) に示す。

$$\begin{Bmatrix} H_i \\ H_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T}{\ell} & -\frac{T}{\ell} \\ -\frac{T}{\ell} & \frac{T}{\ell} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_i \\ v_j \end{Bmatrix} \quad (4.4)$$

ここで、 v は水平方向変位を表す。

図 4.5 は復元力に関して、式 (4.2) で示される理論値と式 (4.3) で示されるモデル値を示したものである。回転角が 18° となっても理論値とモデル値の誤差は 5% であり、今回の実験の振幅範囲では十分式 (4.4) により近似でき得ると考えられる。

以上より、今回の模型実験固有振動解析モデルには、図 4.6 に示すように各ケーブルの両端の間にケーブル軸直角方向にバネを設定して振子運動の復元力を考慮した。なおバネ剛性を式 (4.4) により設定する際のケーブル張力 T としては、模型の主桁自重を静的に載荷した場合に生じる計算上の張力 (図 4.7 参照) を用いることとした。ケーブルの調整力等は考慮していない。表 4.3 に各実験ケースにおける初期張力およびモデル化したバネ係数を示す。

なお、上述した振子運動モデルは、結果的に張力 T を受けた弦の幾何剛性と一致するが、ここではより現象を理解しやすいよう幾何剛性とは分けて考慮した。

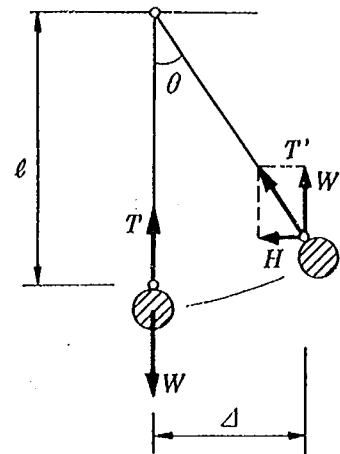


図 4.3 振子運動系

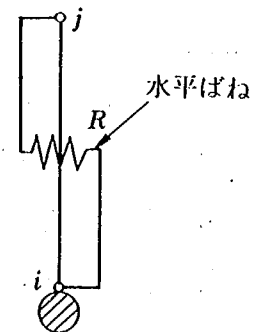


図 4.4 振子運動の復元力モデル

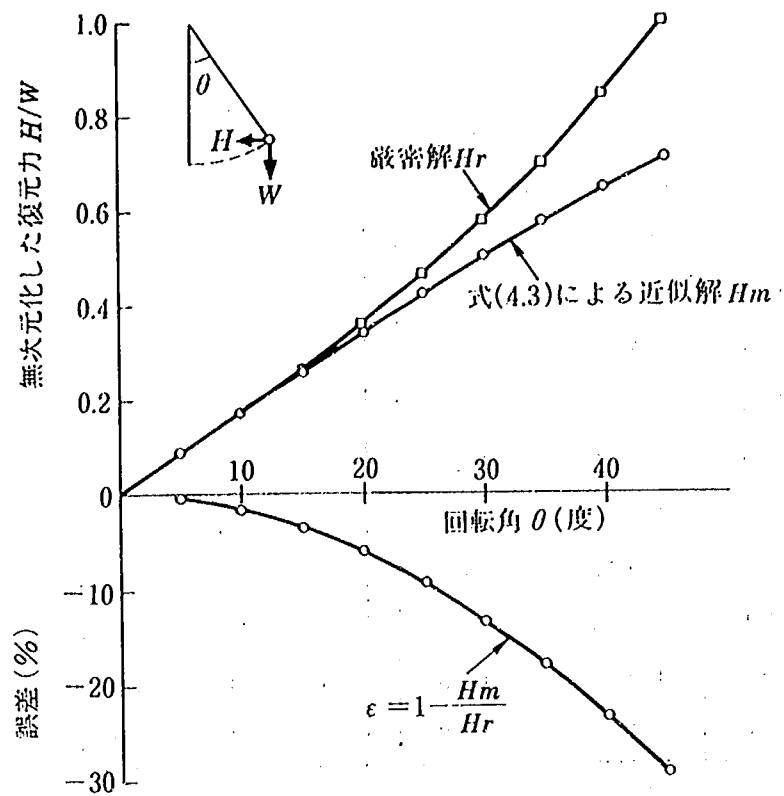


図 4.5 復元力モデルの特性

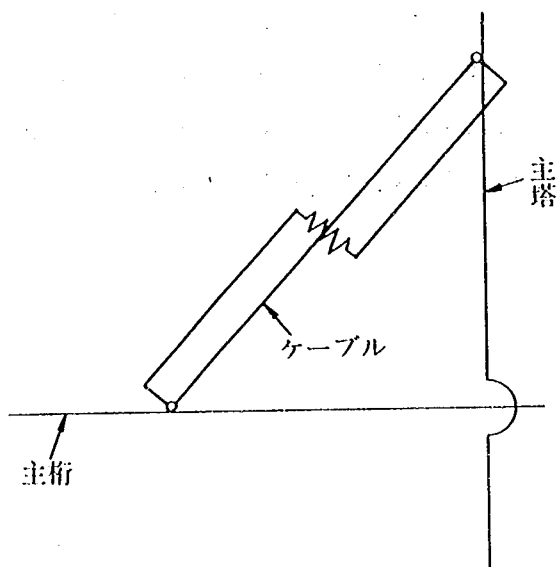


図 4.6 斜材における復元力モデル

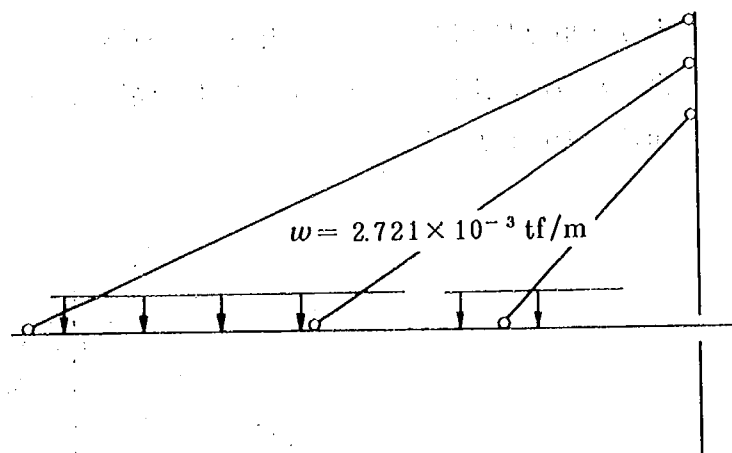


図 4.7 斜材張力の設定

表 4.3 各ケースにおけるケーブル張力および復元力ばね定数

(a) ファン形式

		ケーブル 長 ℓ (m)	ケーブル 張 力 T (kgf)	復 元 力 ばね定数 k (kgf/m)
2 段 張	⑤ ₁	1.184	3.283	2.773
	⑤ ₂	0.481	2.713	5.640
	⑤ ₃	0.481	2.861	5.948
	⑤ ₄	1.230	3.419	2.780
3 段 張	⑤ ₁	1.184	2.628	2.220
	⑤ ₂	0.754	1.534	2.034
	⑤ ₃	0.481	1.963	4.081
	⑤ ₄	0.481	1.844	3.834
	⑤ ₅	0.754	1.990	2.639
	⑤ ₆	1.230	2.452	1.993

(b) ハープ形式

		ケーブル 長 ℓ (m)	ケーブル 張 力 T (kgf)	復 元 力 ばね定数 k (kgf/m)
2 段 張	⑤ ₁	1.184	3.263	2.756
	⑤ ₂	0.378	3.966	10.492
	⑤ ₃	0.378	4.044	10.698
	⑤ ₄	1.230	3.455	2.809
3 段 張	⑤ ₁	1.184	2.635	2.226
	⑤ ₂	0.713	1.721	2.414
	⑤ ₃	0.378	2.910	7.698
	⑤ ₄	0.378	2.579	6.823
	⑤ ₅	0.713	2.331	3.269
	⑤ ₆	1.230	2.469	2.007

4.3 幾何剛性

静的な釣合い状態において、部材にその剛性と比較して大きな軸力が作用している場合、動的な変形が生じると部材内に既に発生している軸力によって復元力に変化する。このような軸力による剛性変化を幾何剛性という。斜張橋においては、図 4.8 に示すように、部材に比較的大きな軸力が作用し、これに比べて部材剛性が小さい場合は幾何剛性を無視し得ない。今回の実験模型は、主桁、主塔および全体の剛性に比べて主桁重量を比較的大きくした為、この幾何剛性を考慮した¹³⁾。

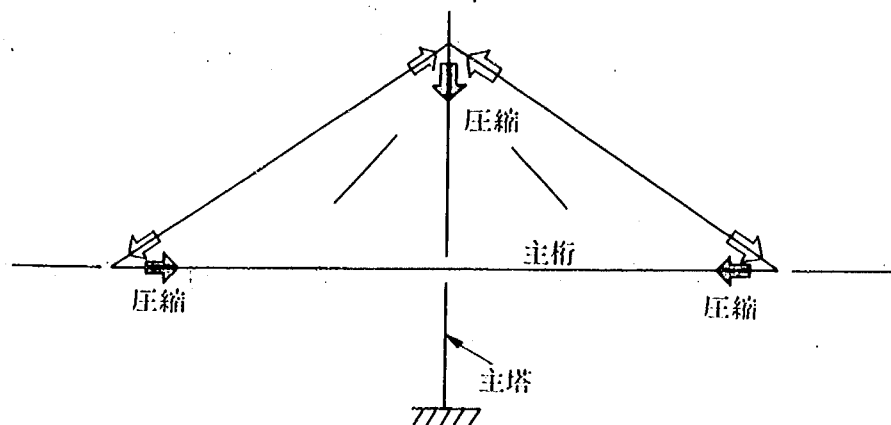


図 4.8 部材作用軸力

式(4.5)に幾何剛性を考慮したはり要素の剛性マトリックスを示す。ここで右辺の最初のマトリックスは通常のはり要素の剛性マトリックスであり、第2番目のマトリックスが幾何剛性マトリックスである。

$$\begin{Bmatrix} N_i \\ N_j \\ S_i \\ S_j \\ M_i \\ M_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{\ell} & -\frac{EA}{\ell} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{EA}{\ell} & \frac{EA}{\ell} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{12EI}{\ell^3} & -\frac{12EI}{\ell^3} & \frac{6EI}{\ell^2} & \frac{6EI}{\ell^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI}{\ell^3} & \frac{12EI}{\ell^3} & -\frac{6EI}{\ell^2} & -\frac{6EI}{\ell^2} \\ 0 & 0 & \frac{6EI}{\ell^2} & -\frac{6EI}{\ell^2} & \frac{4EI}{\ell} & \frac{2EI}{\ell} \\ 0 & 0 & \frac{6EI}{\ell^2} & -\frac{6EI}{\ell^2} & \frac{2EI}{\ell} & \frac{4EI}{\ell} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6T}{5\ell} & -\frac{6T}{5\ell} & \frac{T}{10} & \frac{T}{10} \\ 0 & 0 & -\frac{6T}{5\ell} & \frac{6T}{5\ell} & -\frac{T}{10} & -\frac{T}{10} \\ 0 & 0 & \frac{T}{10} & -\frac{T}{10} & \frac{4T\ell}{30} & -\frac{T\ell}{30} \\ 0 & 0 & \frac{T}{10} & -\frac{T}{10} & -\frac{T\ell}{30} & \frac{4T\ell}{30} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \\ v'_i \\ v_j \\ \theta_i \\ \theta_j \end{Bmatrix} \quad (4.5)$$

ここで、 E ：部材の弾性係数

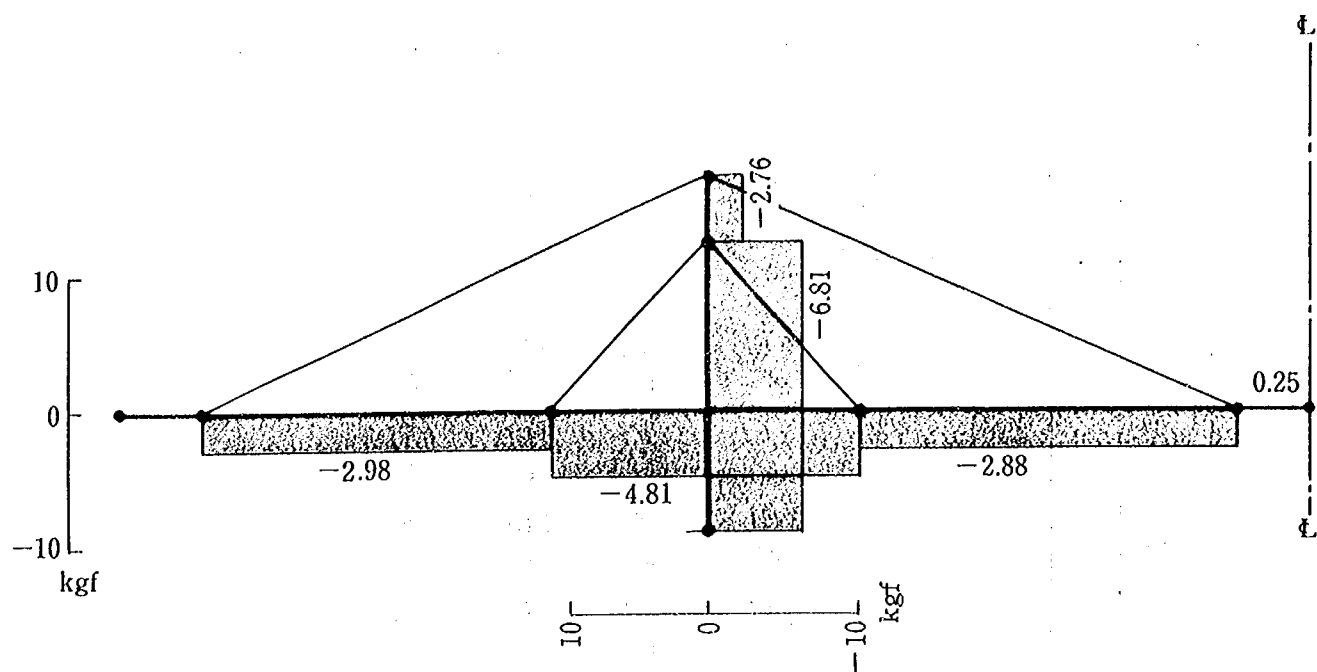
A ： " 断面積

I ： " 断面2次モーメント

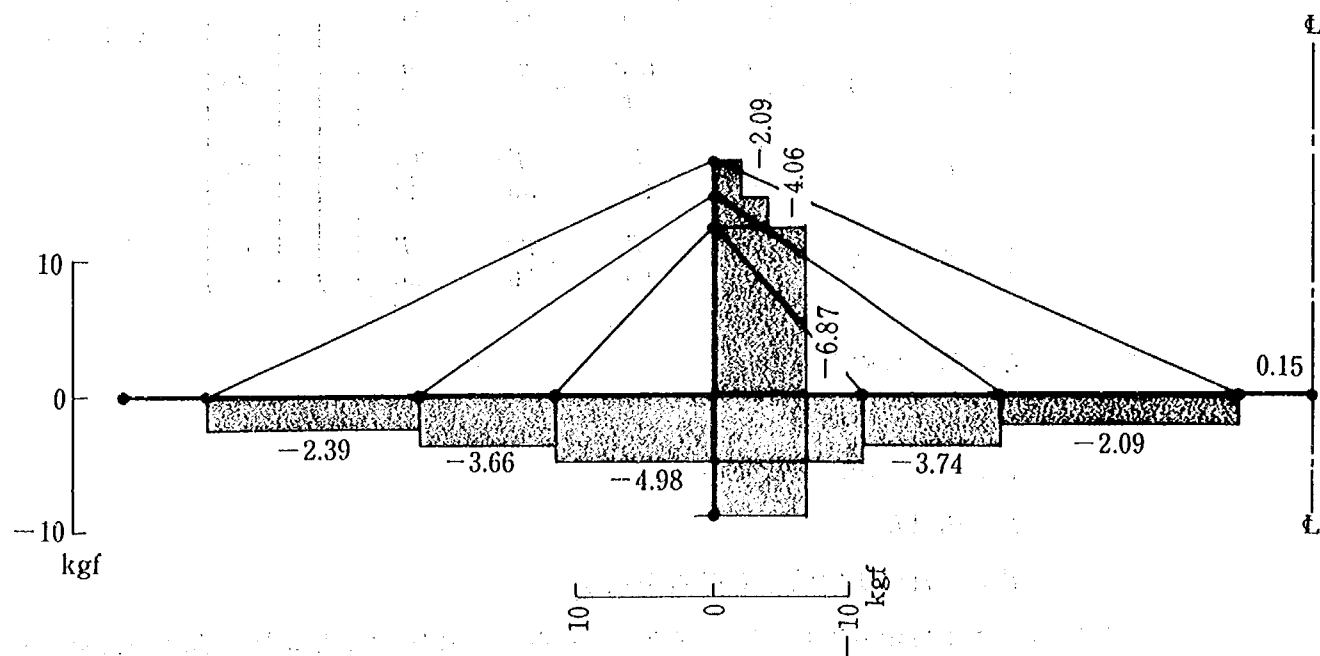
ℓ ：部材長

T ：部材の初期軸力（引張を正）

なお、計算に用いた部材軸力は4.2においてケーブル張力を設定した際と同様の方式で計算した結果を用いた。各実験ケースにおける部材力を図4.9に示す。

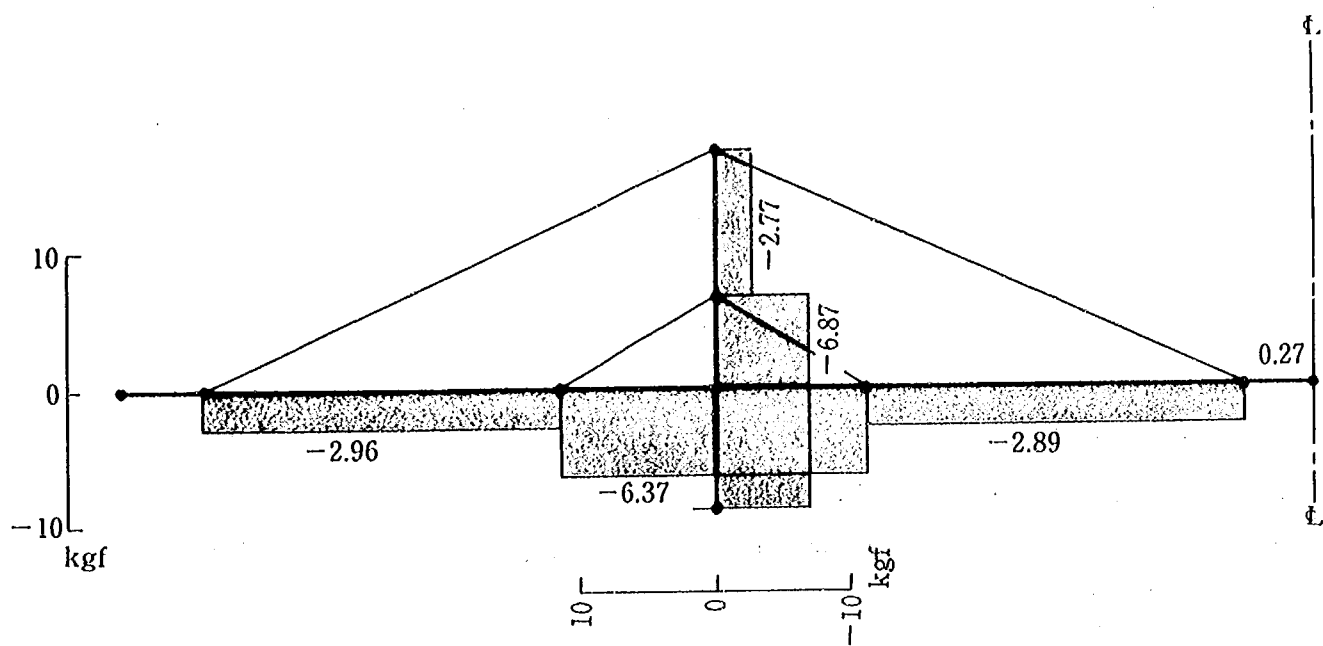


(a) ファン形式 2 段張

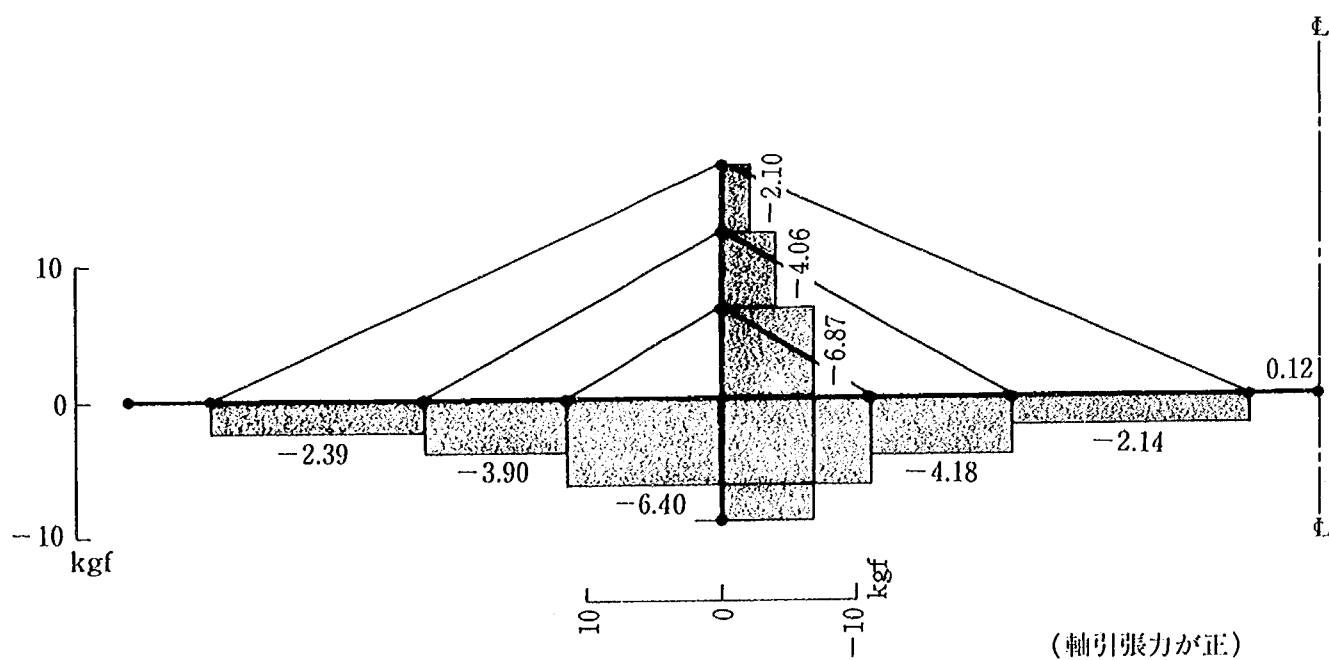


(b) ファン形式 3 段張

図 4.9 各実験ケースにおける主桁自重による軸力



(c) ハープ形式 2 段張



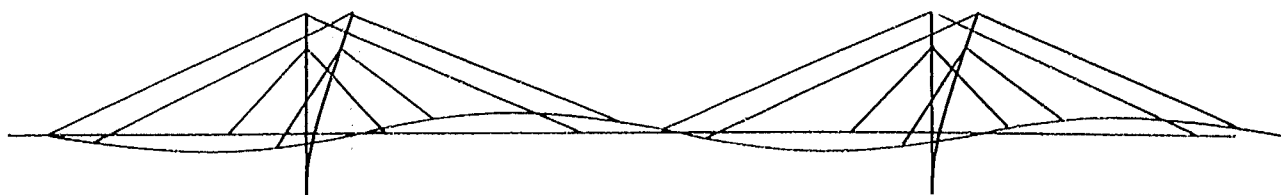
(d) ハープ形式 3 段張

図 4.9 各実験ケースにおける主桁自重による軸力

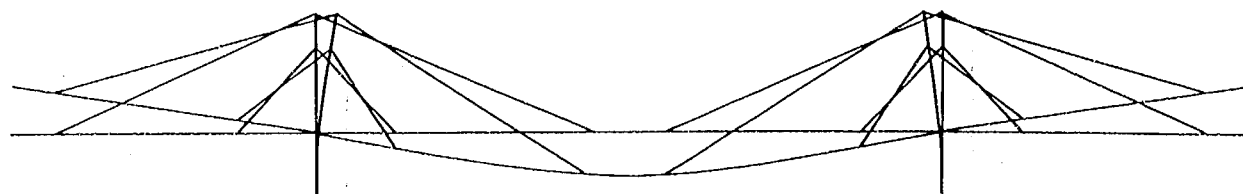
4.4 固有振動解析結果

モード図を図 4.10～図 4.13 に示す。また橋軸方向および鉛直方向それぞれについて、解析による一次固有周期と実験値と比較して表 4.4 に示す。両者は良く一致していると言うことができる。今回の実験のように、振幅の大きな領域においても、離散系骨組構造にモデル化した解析より固有振動特性を求めることが可能である。なお表 4.4 には、幾何剛性を考慮しない場合、および振子運動、幾何剛性の両方を考慮しない場合の計算値を示している。これらの条件では、計算値と実験値との一致度が低く、今回の実験では主桁の支持方式や、模型の剛性、質量の関係で振子運動および幾何剛性の影響が無視できないことを示している。

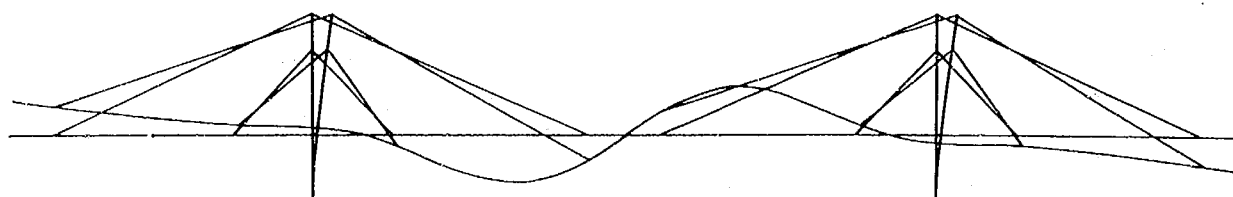
表 4.4 及び図 4.10 によれば、ファン形式の場合にはケーブル段数によらず橋軸方向の 1 次固有周期の方が鉛直方向の 1 次固有周期よりもやや長い、ハープ形式の場合にはこれとは反対になっている。ここで、橋軸方向の 1 次固有周期と鉛直方向の 1 次固有周期を比較すると、ファン形式の場合には大きな違いはないが、ハープ形式の場合にはかなりの差があることが注目される。これはハープ形式の橋軸方向一次モードに担当する剛性が鉛直方向の 1 次モードに比べて相対的にかなり高いことを意味している。



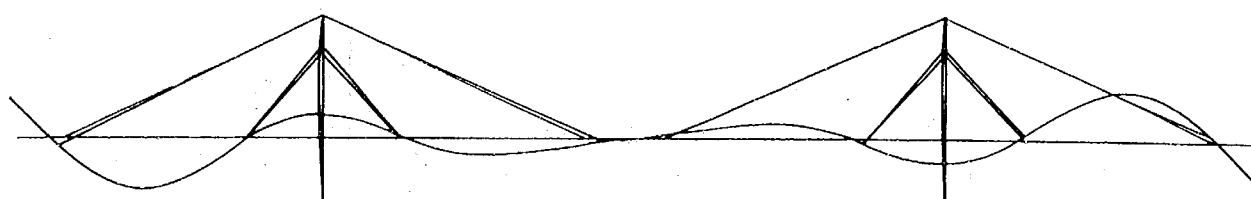
(a) 1次振動モード ($T_1 = 1.86$ 秒)



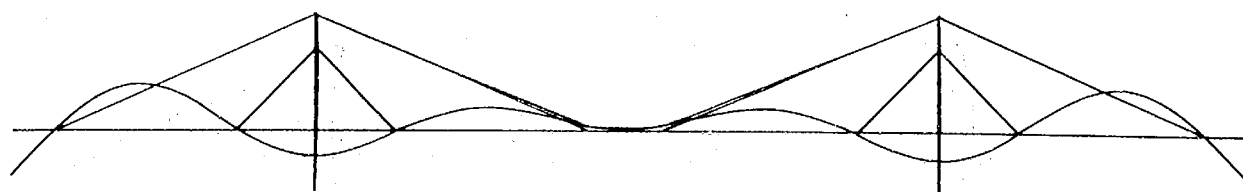
(b) 2次振動モード ($T_2 = 1.61$ 秒)



(c) 3次振動モード ($T_3 = 0.48$ 秒)

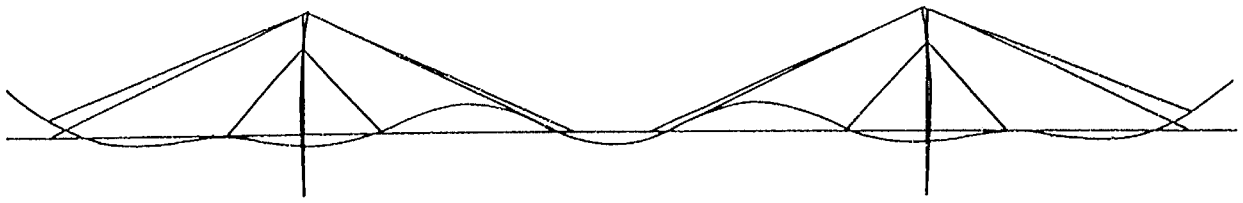


(d) 4次振動モード ($T_4 = 0.28$ 秒)

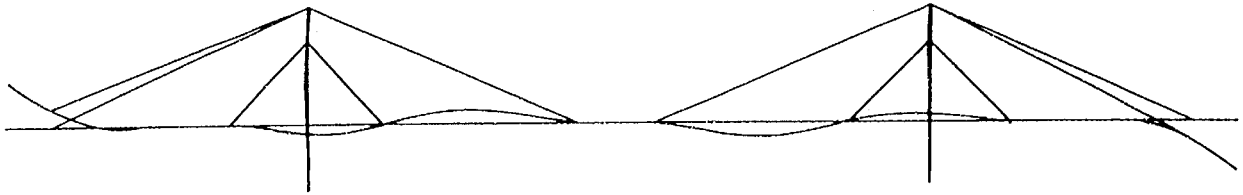


(e) 5次振動モード ($T_5 = 0.28$ 秒)

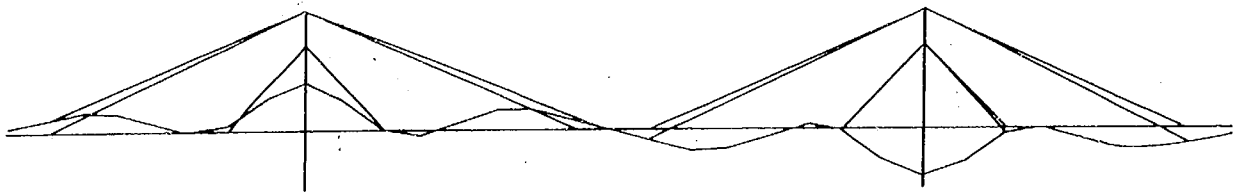
図 4.10 ファン形式2段張ケースの固有振動モード



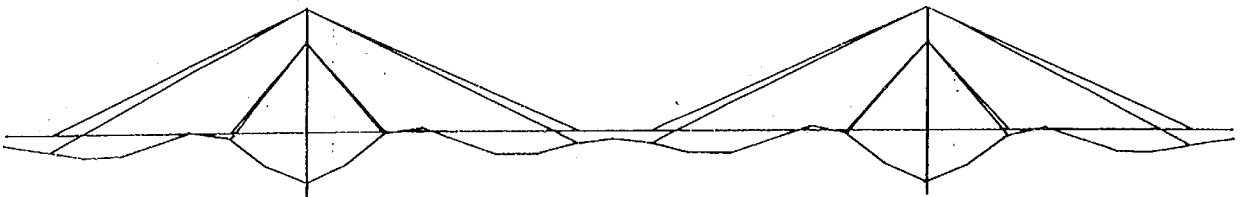
(f) 6次振動モード ($T_6 = 0.20$ 秒)



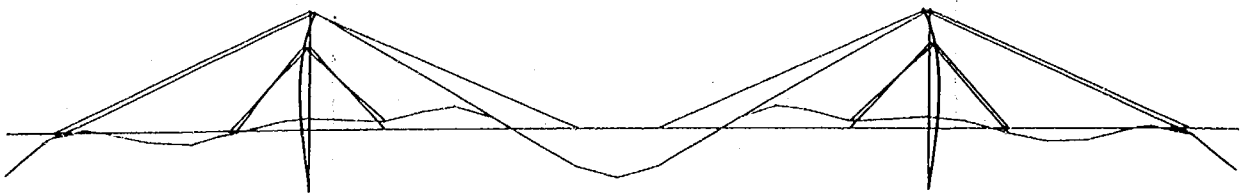
(g) 7次振動モード ($T_7 = 0.18$ 秒)



(h) 8次振動モード ($T_8 = 0.13$ 秒)

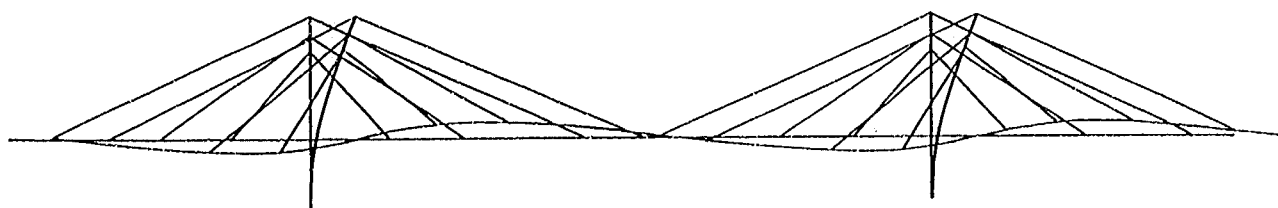


(i) 9次振動モード ($T_9 = 0.13$ 秒)

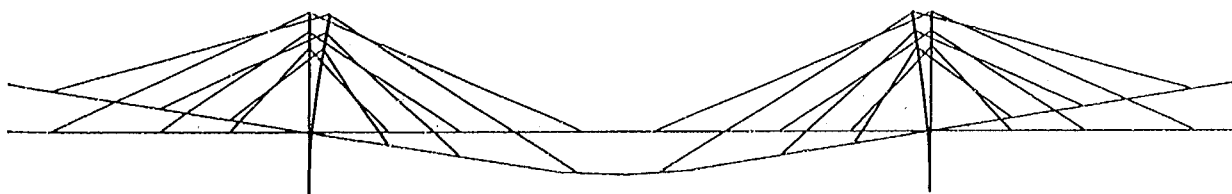


(j) 10次振動モード ($T_{10} = 0.11$ 秒)

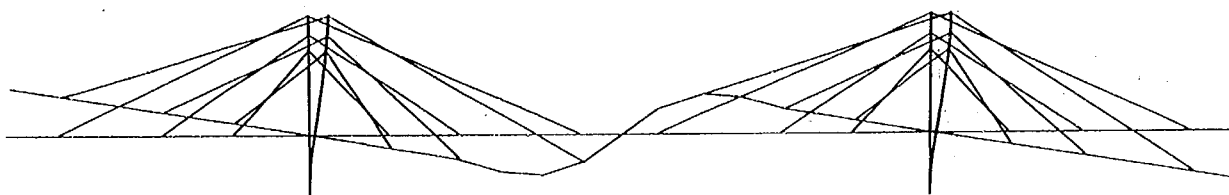
図 4.10 ファン形式 2 段張ゲースの固有振動モード



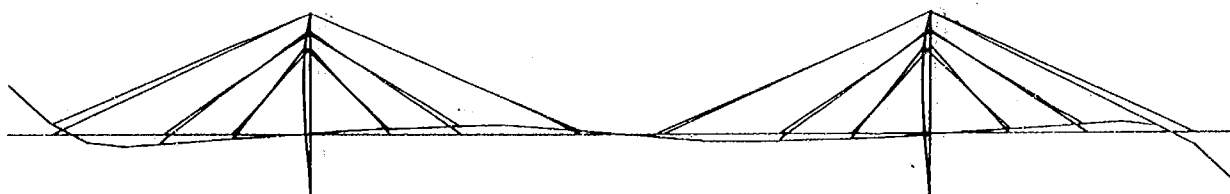
(a) 1次振動モード ($T_1 = 1.77$ 秒)



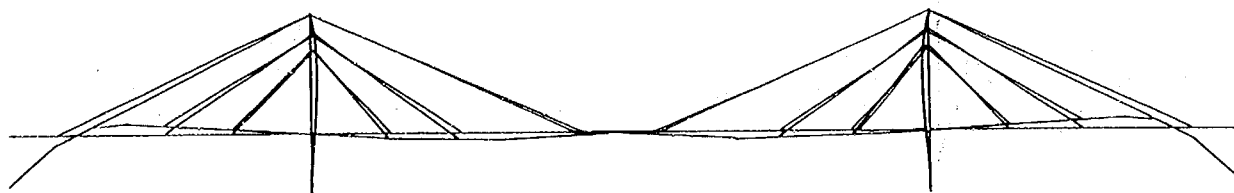
(b) 2次振動モード ($T_2 = 1.53$ 秒)



(c) 3次振動モード ($T_3 = 0.36$ 秒)

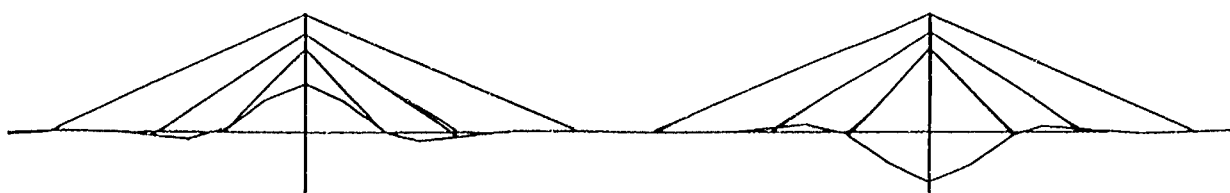


(d) 4次振動モード ($T_4 = 0.15$ 秒)

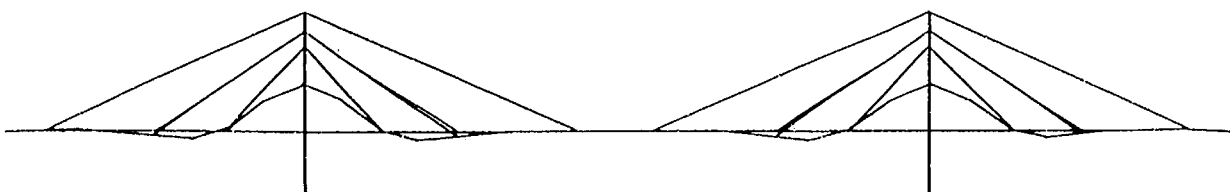


(e) 5次振動モード ($T_5 = 0.15$ 秒)

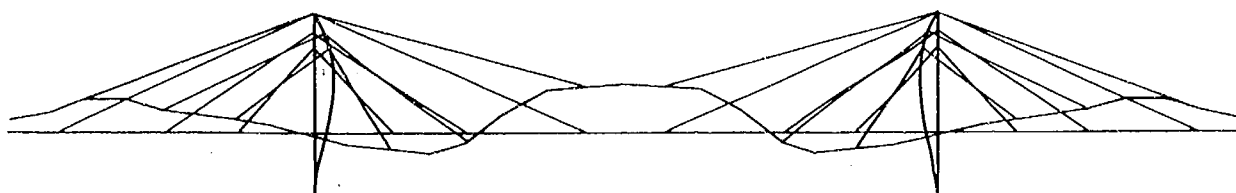
図 4.11 ファン形式3段張ケースの固有振動モード



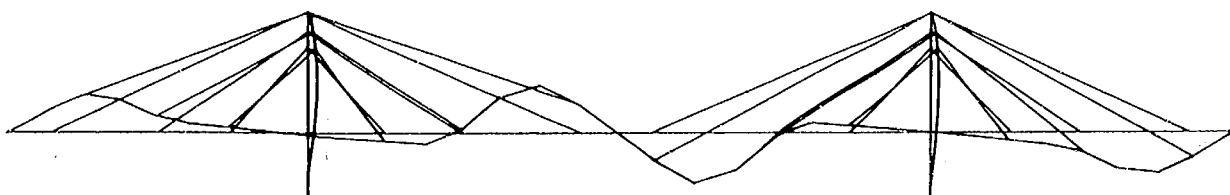
(f) 6次振動モード ($T_6 = 0.14$ 秒)



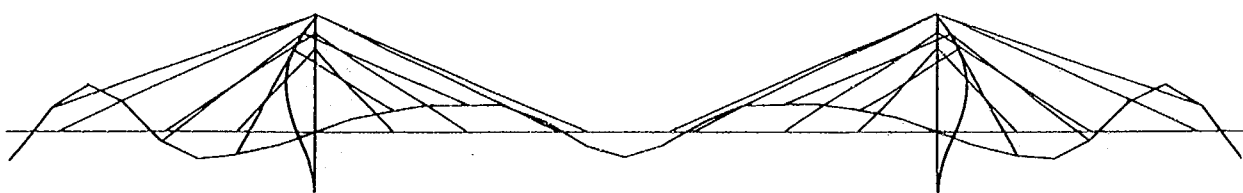
(g) 7次振動モード ($T_7 = 0.14$ 秒)



(h) 8次振動モード ($T_8 = 0.11$ 秒)

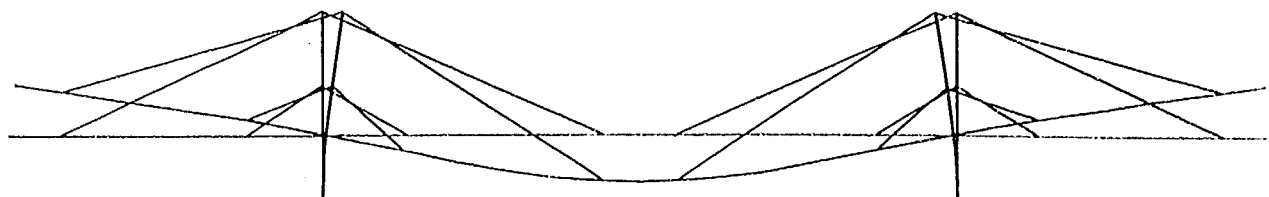


(i) 9次振動モード ($T_9 = 0.11$ 秒)

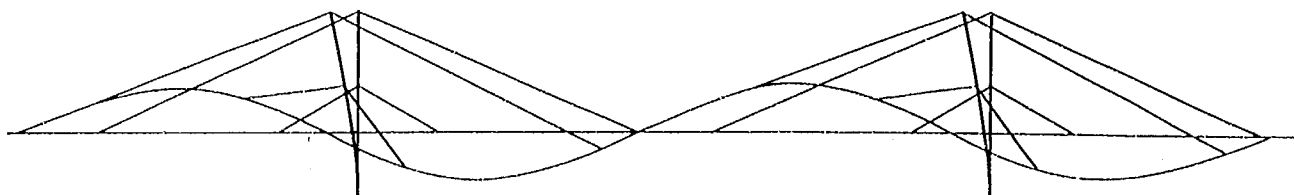


(j) 10次振動モード ($T_{10} = 0.09$ 秒)

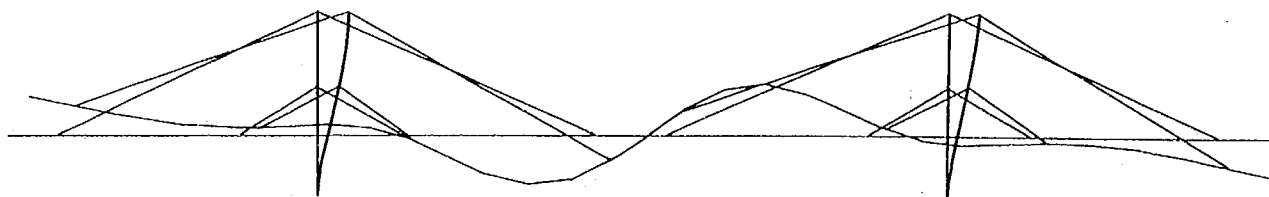
図 4.11 フェン形式3段張ケースの固有振動モード



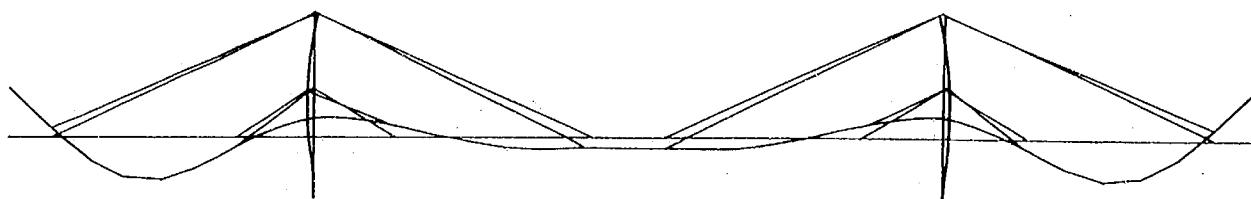
(a) 1次振動モード ($T_1 = 1.67$ 秒)



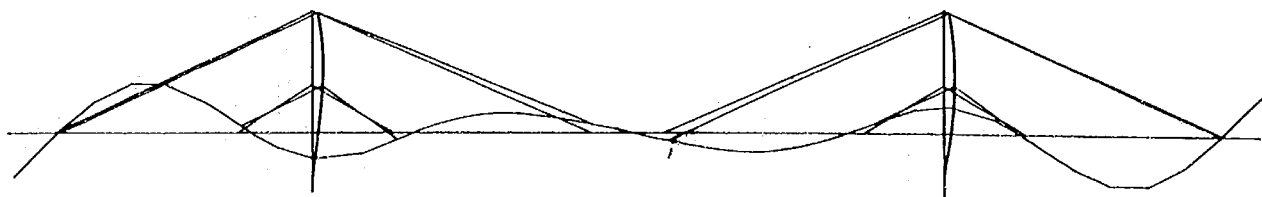
(b) 2次振動モード ($T_2 = 1.20$ 秒)



(c) 3次振動モード ($T_3 = 0.47$ 秒)

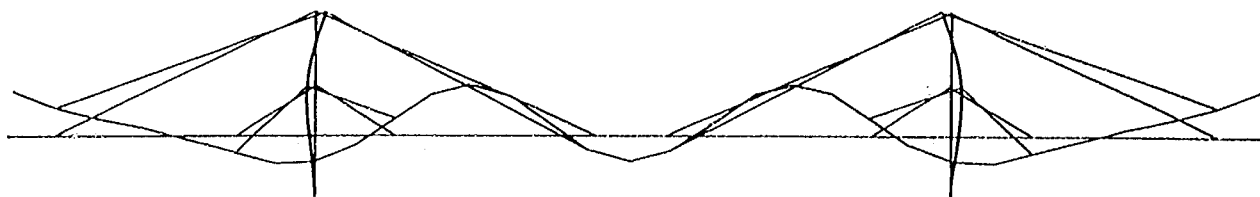


(d) 4次振動モード ($T_4 = 0.30$ 秒)

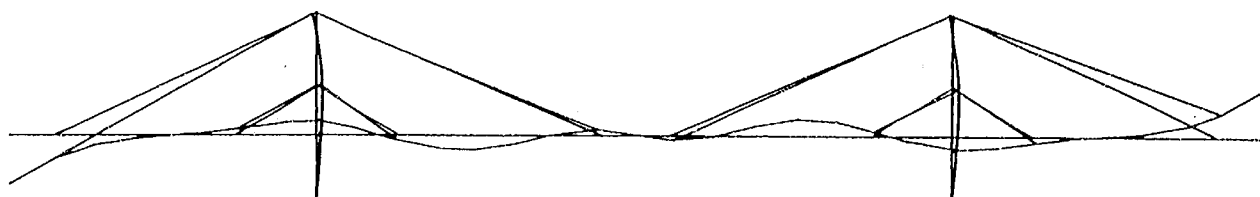


(e) 5次振動モード ($T_5 = 0.30$ 秒)

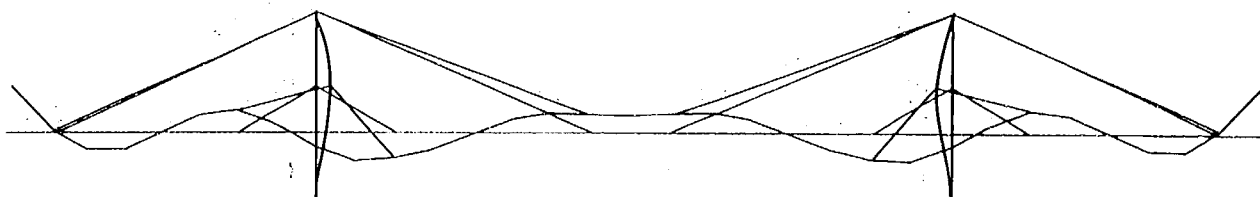
図 4.12 ハープ形式2段張ケースの固有振動モード



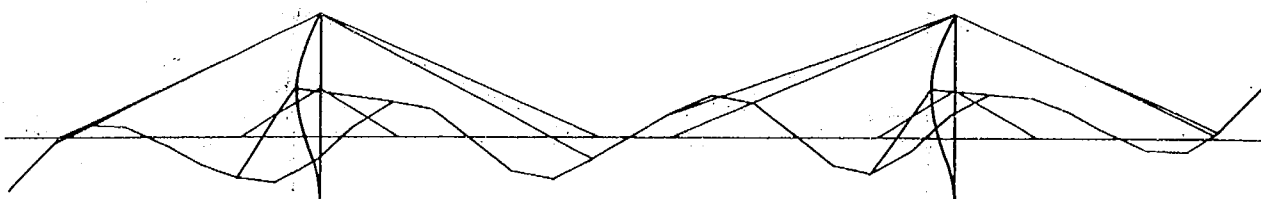
(f) 6次振動モード ($T_6 = 0.24$ 秒)



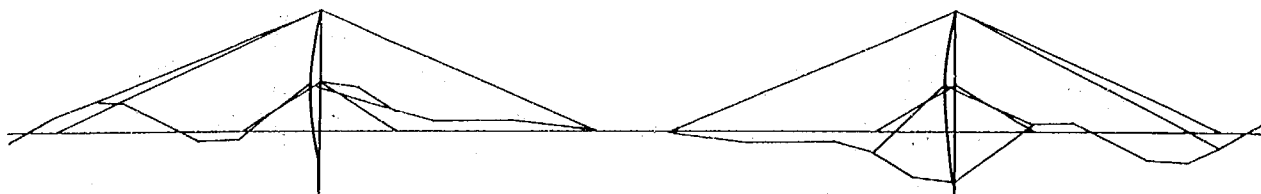
(g) 7次振動モード ($T_7 = 0.19$ 秒)



(h) 8次振動モード ($T_8 = 0.14$ 秒)

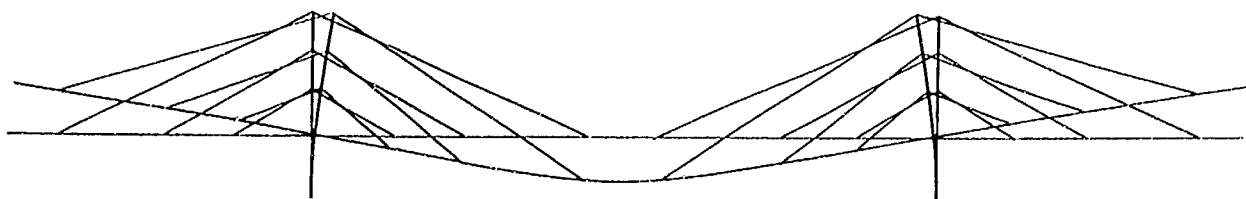


(i) 9次振動モード ($T_9 = 0.14$ 秒)

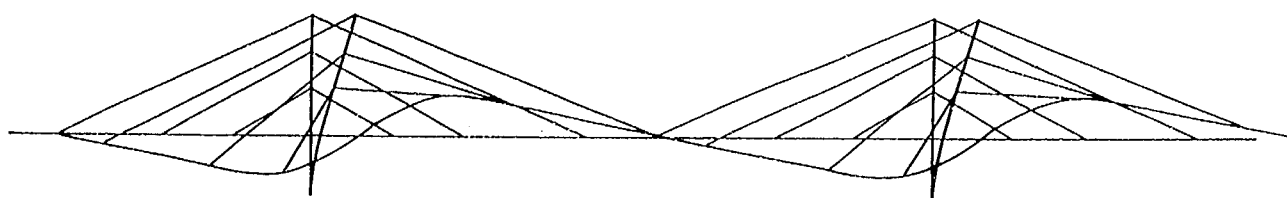


(j) 10次振動モード ($T_{10} = 0.14$ 秒)

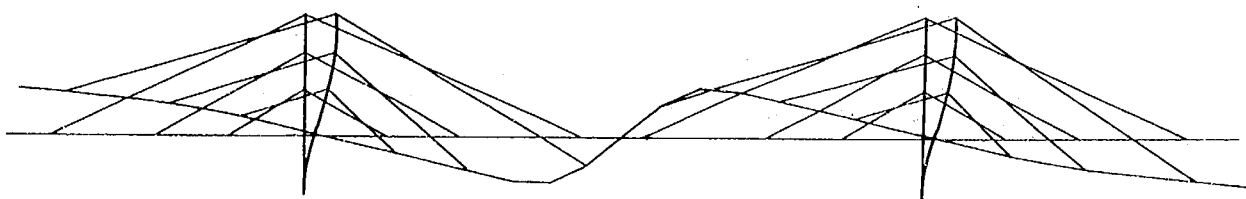
図 4.12 ハープ形式2段張ケースの固有振動モード



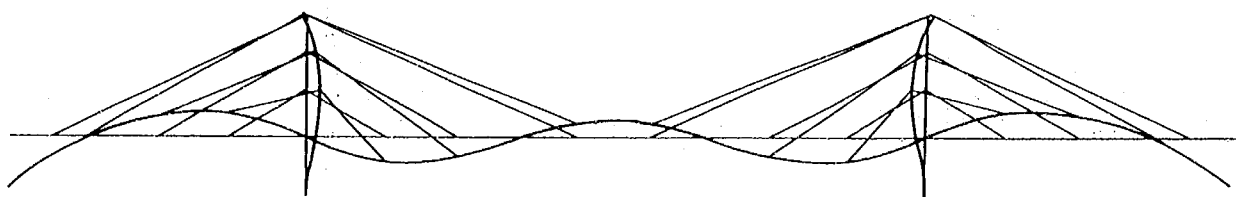
(a) 1次振動モード ($T_1 = 1.52$ 秒)



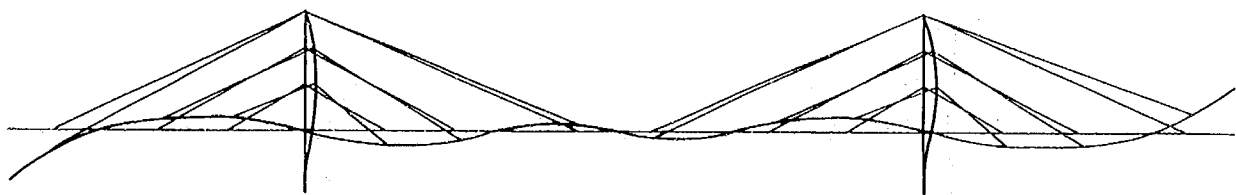
(b) 2次振動モード ($T_2 = 0.75$ 秒)



(c) 3次振動モード ($T_3 = 0.39$ 秒)

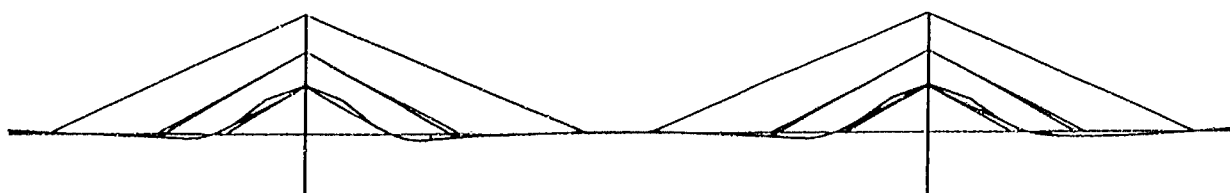


(d) 4次振動モード ($T_4 = 0.21$ 秒)

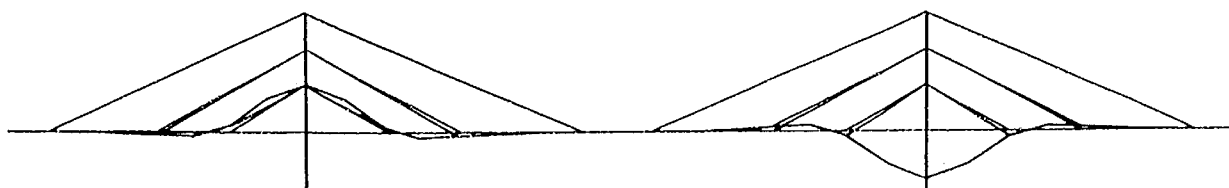


(e) 5次振動モード ($T_5 = 0.19$ 秒)

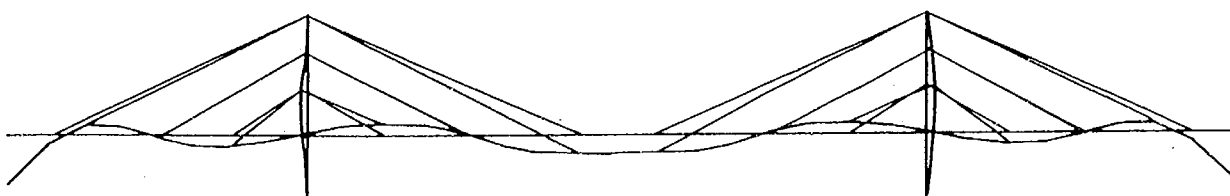
図 4.13 ハープ形式3段張ケースの固有振動モード



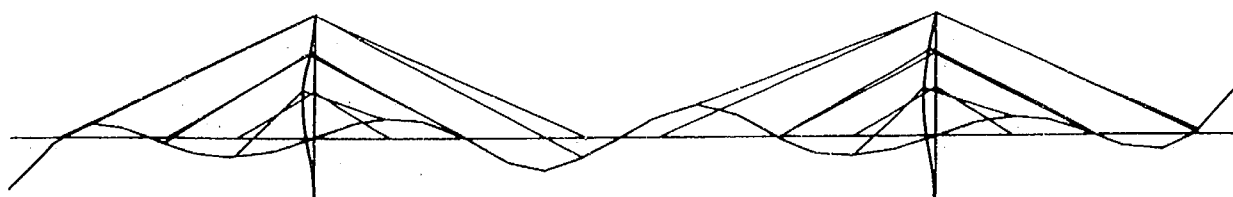
(f) 6次振動モード ($T_6 = 0.15$ 秒)



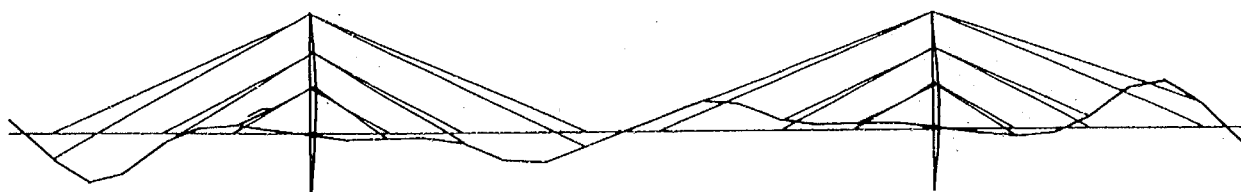
(g) 7次振動モード ($T_7 = 0.15$ 秒)



(h) 8次振動モード ($T_8 = 0.13$ 秒)



(i) 9次振動モード ($T_9 = 0.13$ 秒)



(j) 10次振動モード ($T_{10} = 0.11$ 秒)

図 4.13 ハープ形式3段張ケースの固有振動モード

表 4.4 固有周期（秒）（実験値および解析値の比較）

	振動方向	フ ェ ン 形 式		ハ ー プ 形 式	
		2 段	3 段	2 段	3 段
実 験 値	橋 軸 1 次	1.76	1.71	1.20	0.78
	鉛 直 1 次	1.62	1.57	1.66	1.55
計 算 値 (振 子 , 幾 何 剛 性 考 慮)	橋 軸 1 次	1.85	1.77	1.20	0.75
	鉛 直 1 次	1.61	1.53	1.67	1.52
計 算 値 (振 子 運 動 の み 考 慮)	橋 軸 1 次	1.24	1.21	0.76	0.58
	鉛 直 1 次	0.99	0.96	0.99	0.94
計 算 値 (振 子 , 幾 何 剛 性 考 慮 せ ず)	橋 軸 1 次	1.31	1.26	0.91	0.63
	鉛 直 1 次	1.72	1.63	1.78	1.61

5. 実験結果

5.1 実験結果の処理

非接触型変位計より記録された自由振動波形データに対して零点補正した後、10 Hz 以上の振動数成分を除去した。

減衰定数は、図 5.1 に示すように各波 1 周期の振動振幅を求め、時刻 t_i の減衰定数はその時刻の前後 2 周期分に担当する時刻 $t_i \pm 2T$ における振動振幅の勾配から次式により算出した。

$$h_i = \frac{1}{2\pi \cdot n} \ln \frac{a_{t_i-2T}}{a_{t_i+2T}} \quad (n=4) \quad (5.1)$$

なお、ハープ形式 2 段張で橋軸方向に加振した場合には、橋軸 1 次モードと同時に鉛直 1 次モードが混入するため（図 5.2 g）参照）、橋軸 1 次モードを表わす以外の振動数成分を（0.8 ～ 2.0 Hz 以外）除去した後、式（5.1）により減衰定数を算出した（図 5.2 g'）。

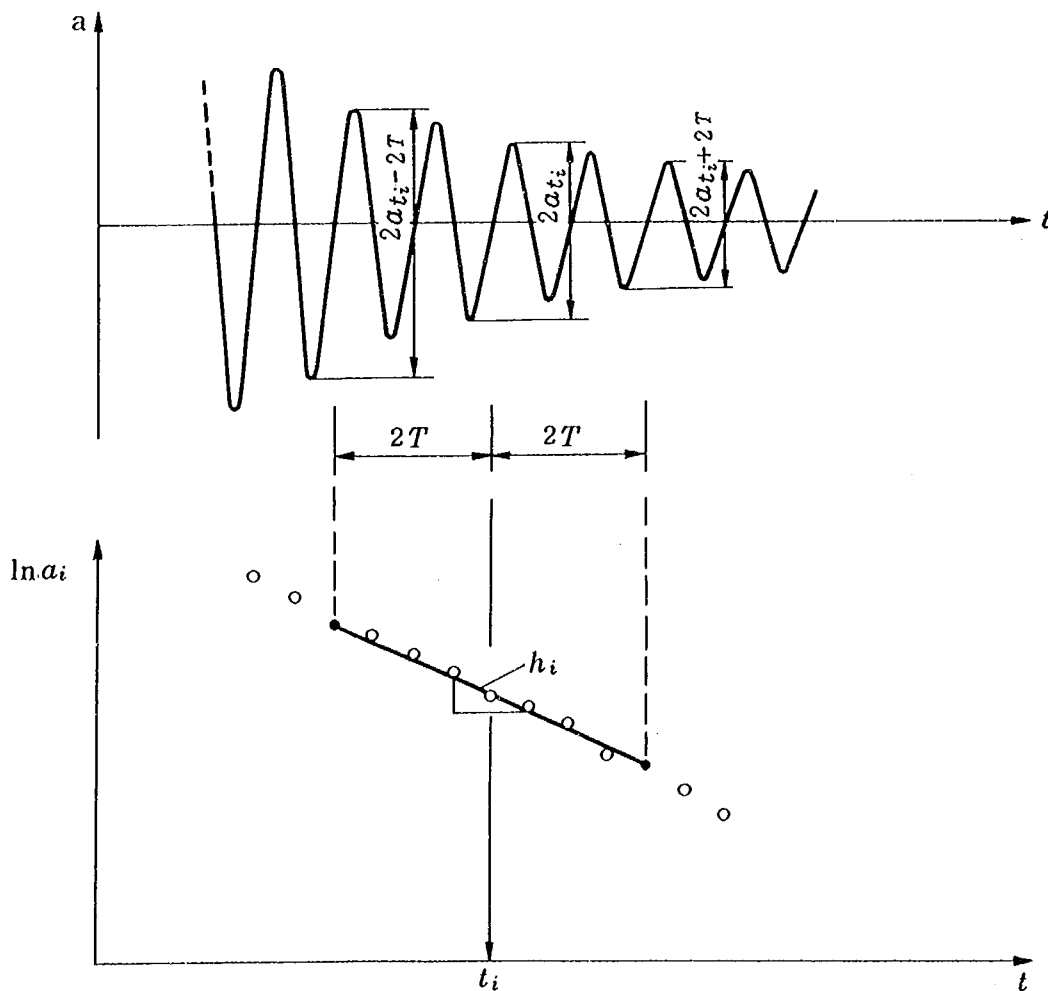
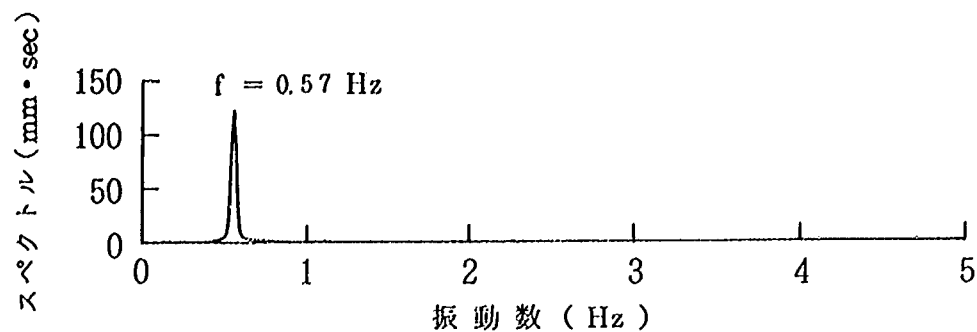


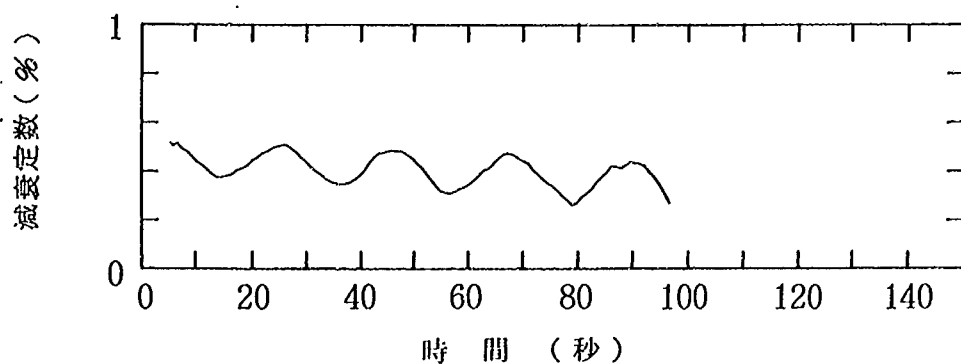
図 5.1 減衰定数の算出法

5.2 自由振動波形及び減衰定数

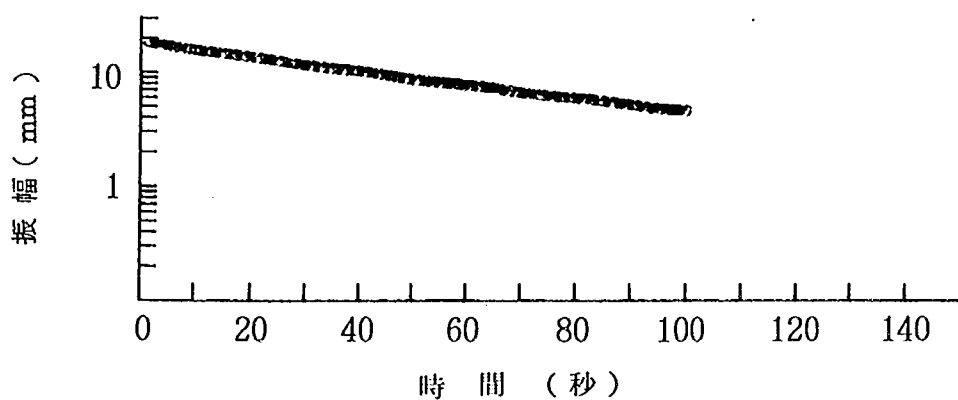
加振方向別に各実験ケースの自由振動波形，時間－ $\ln$ （振動振幅）関係，減衰定数の経時変化およびフーリエスペクトルを図 5.2 a)～h) に示す。全ケースとも自由振動は指数関数的に減少するが，その程度は実験ケース，加振方向別に異なる。これについては次章に示す。



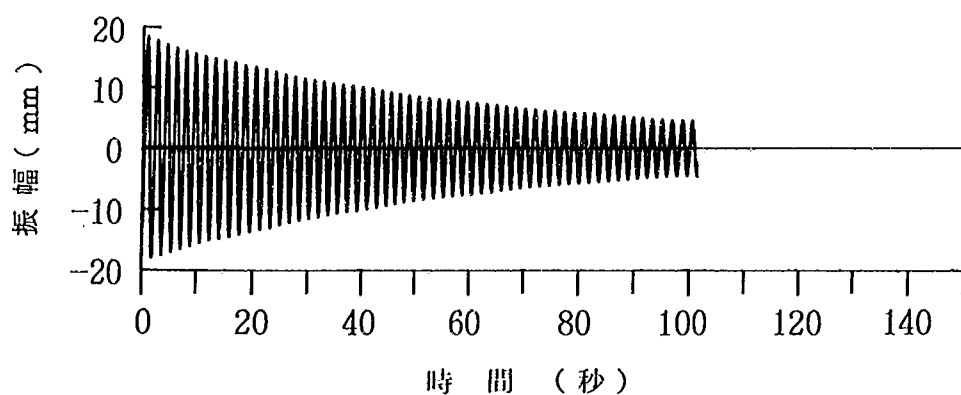
(V) フーリエスペクトル



(III) 減衰定数の経時変化



(II) 時間 - $\ln$ (振幅) 関係



(I) 自由振動波形

図 5.2 a) ファン形式 2 段橋軸方向加振(1)

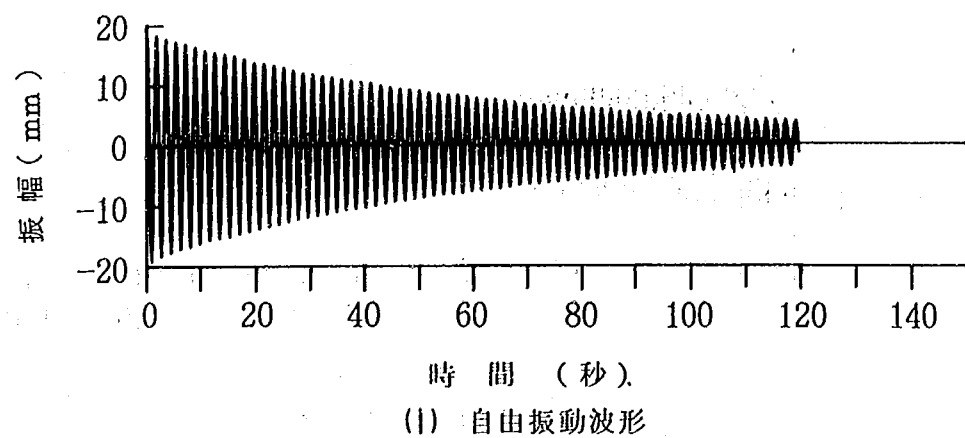
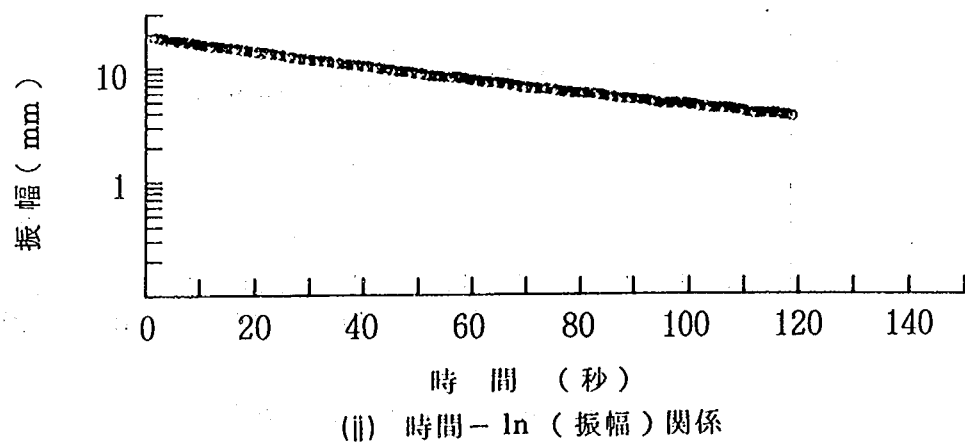
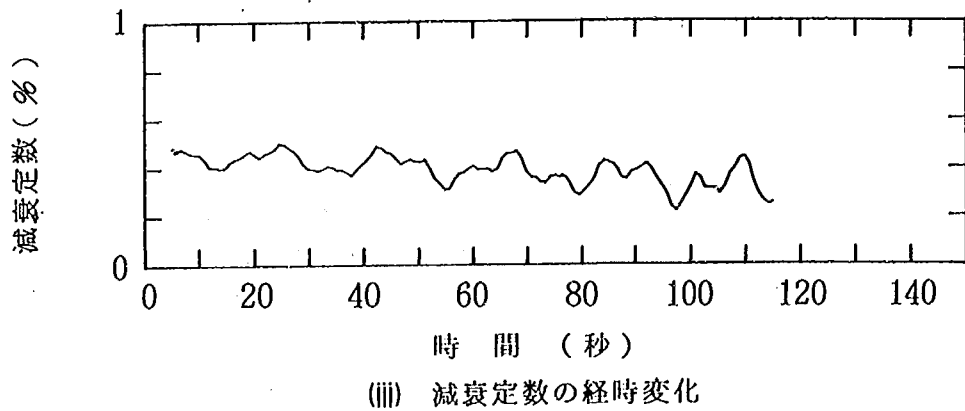
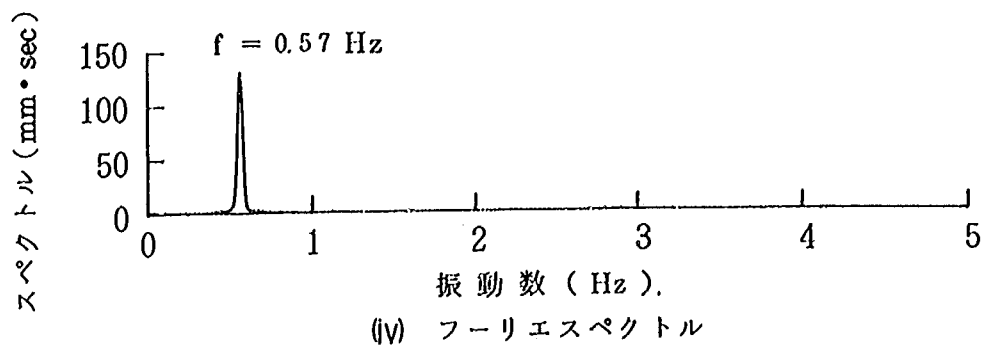


図 5.2 a) ファン形式 2 段橋軸方向加振 (2)

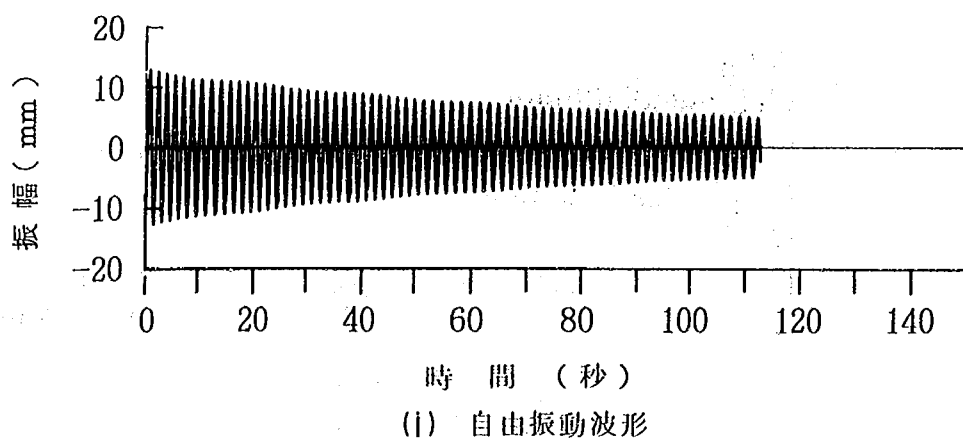
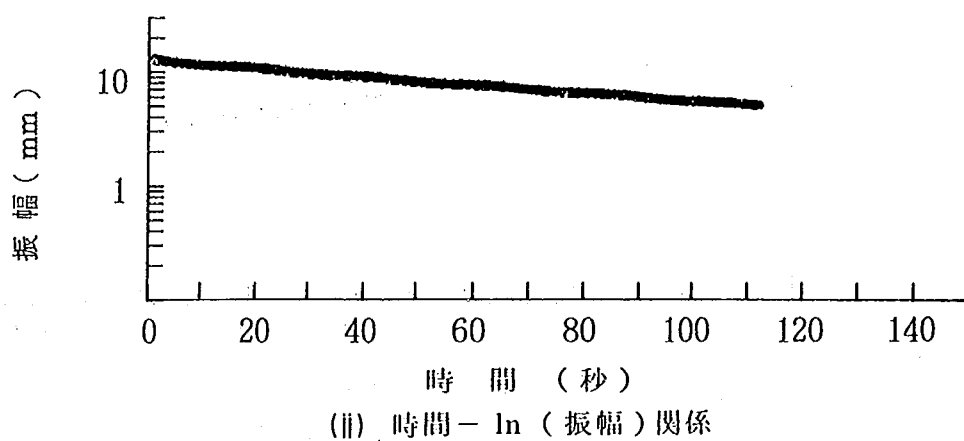
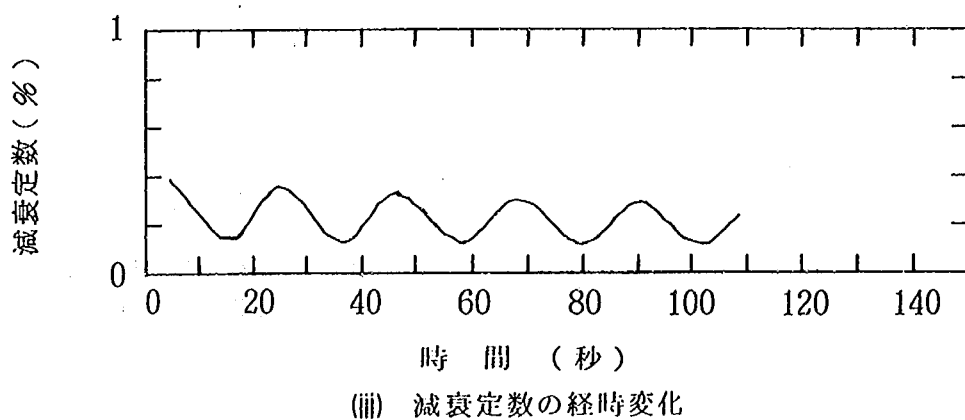
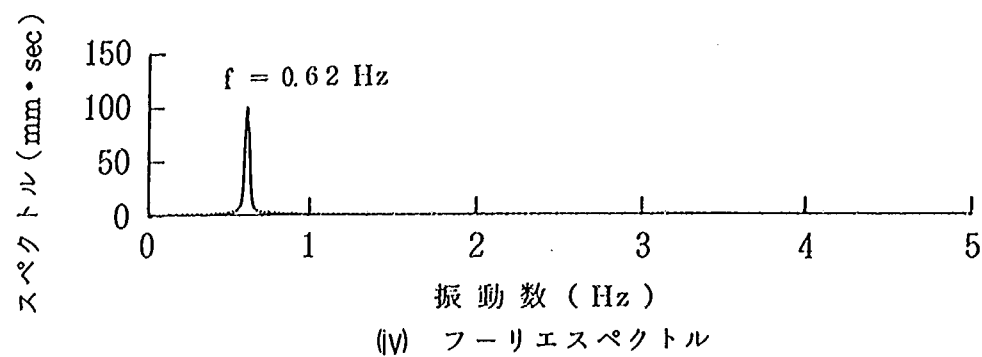
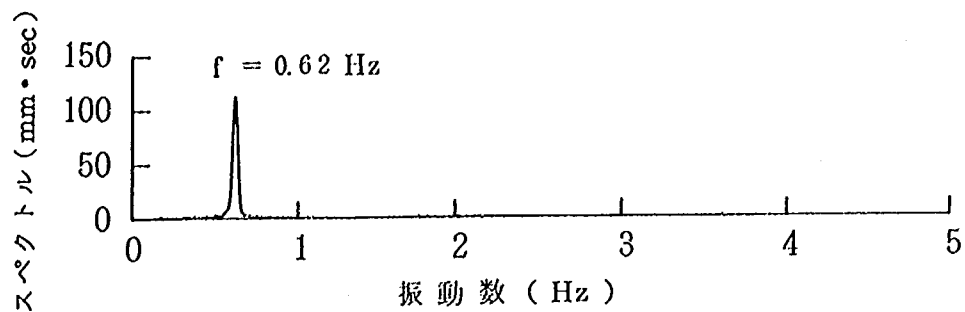
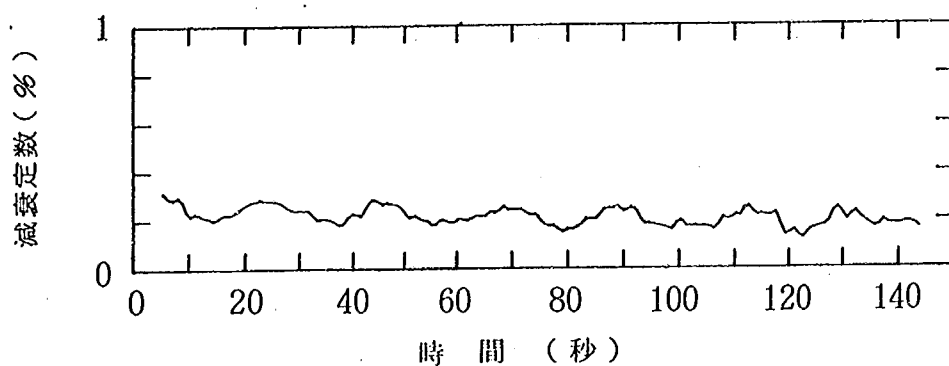


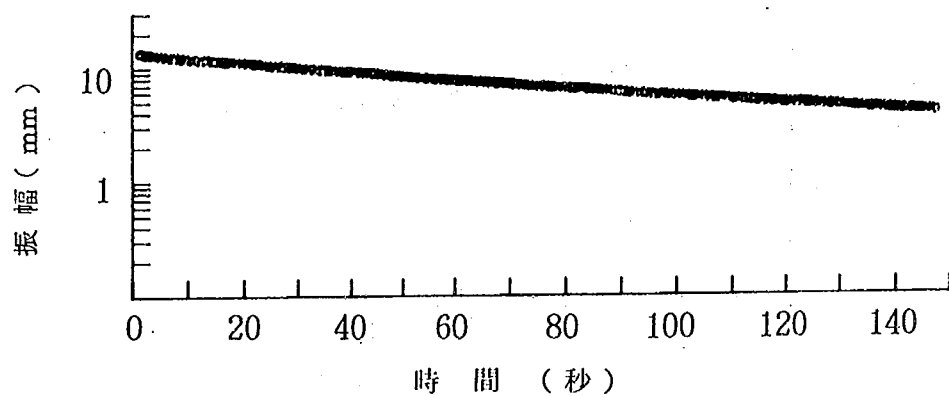
図 5.2 b) ファン形式 2 段鉛直方向加振(1)



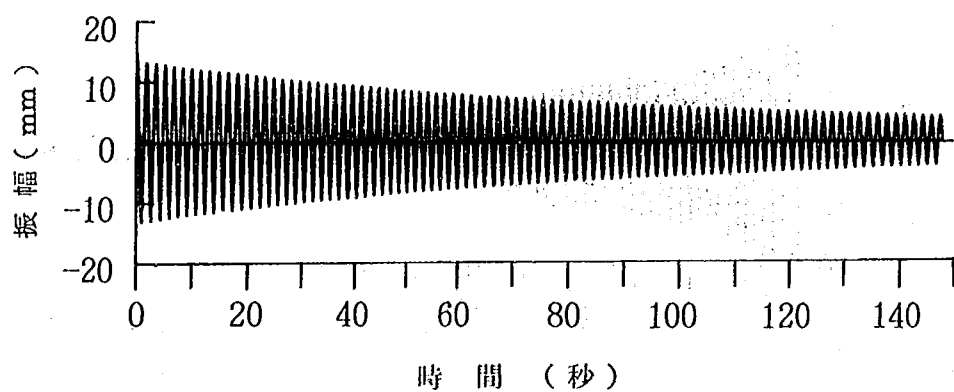
(V) フーリエスペクトル



(III) 減衰定数の経時変化



(II) 時間 - $\ln$ (振幅) 関係



(I) 自由振動波形

図 5.2 b) ファン形式 2 段鉛直方向加振(2)

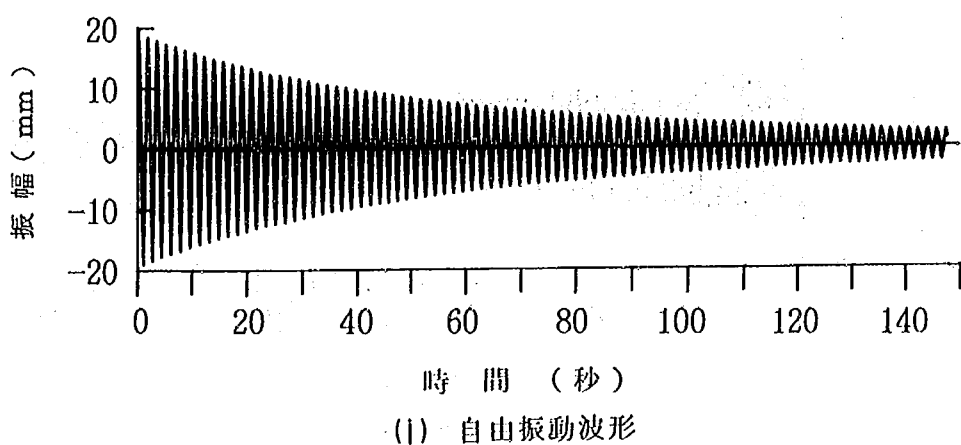
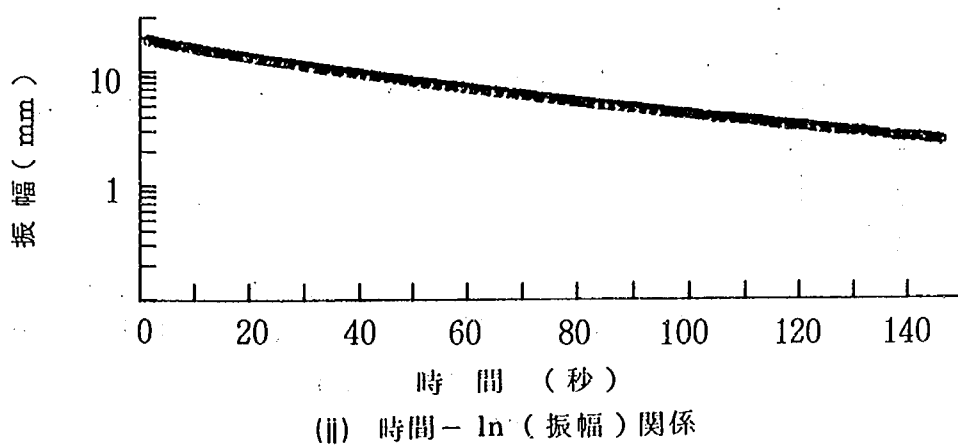
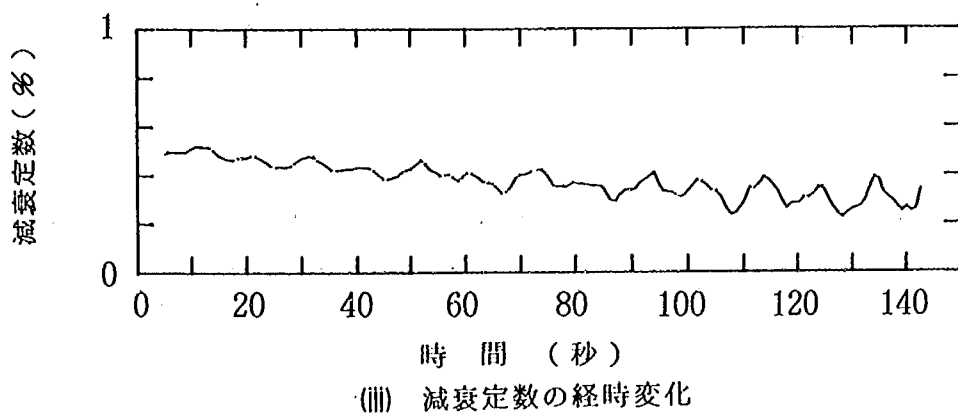
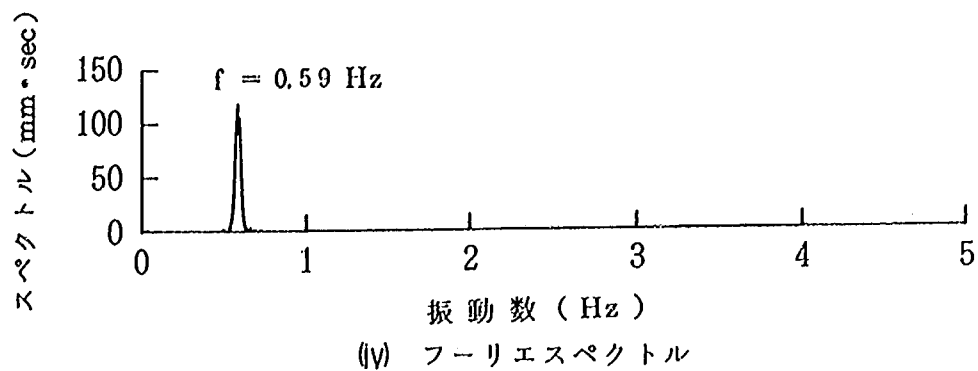
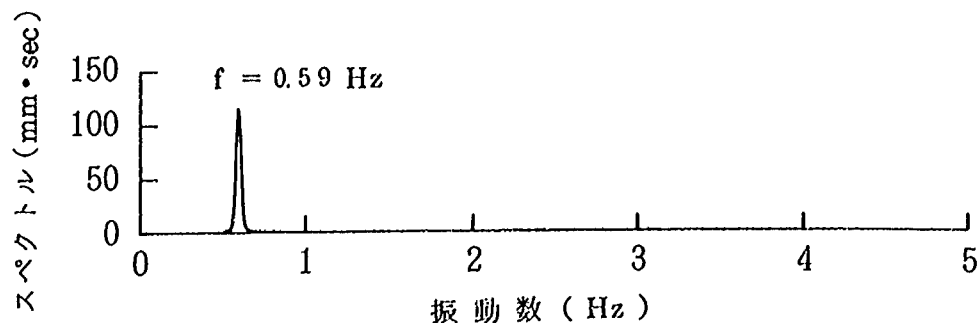
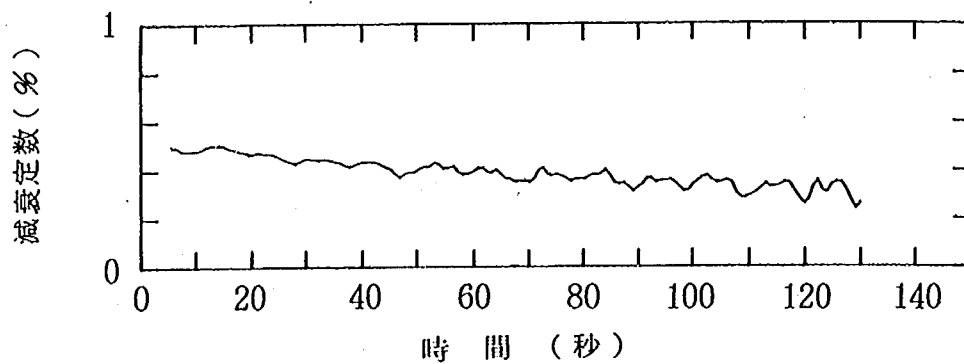


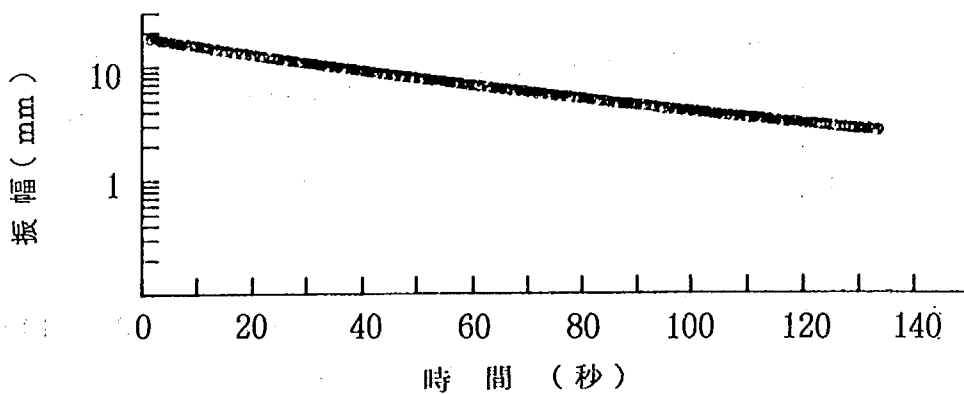
図 5.2 c) ファン形式 3 段橋軸方向加振(1)



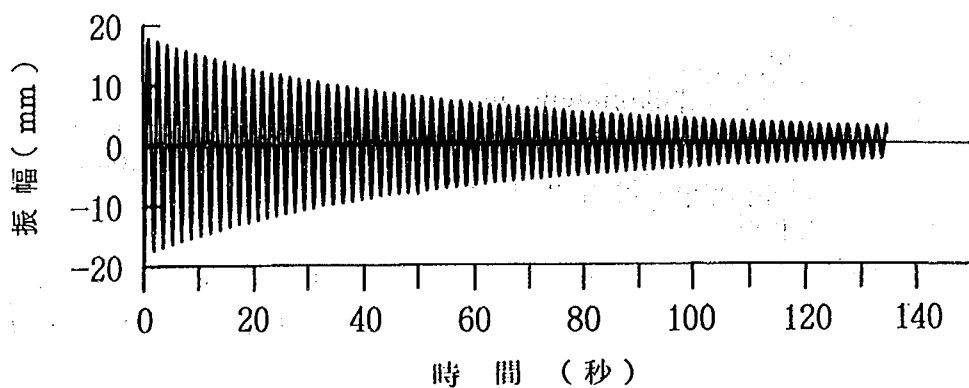
(v) フーリエスペクトル



(iii) 減衰定数の経時変化



(ii) 時間 - $\ln$ (振幅) 関係



(i) 自由振動波形

図 5.2 e) ファン形式 3 段橋軸方向加振(2)

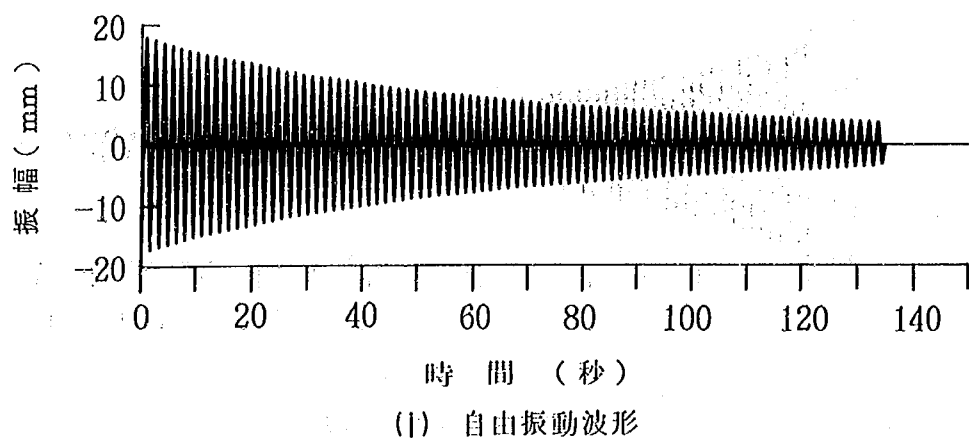
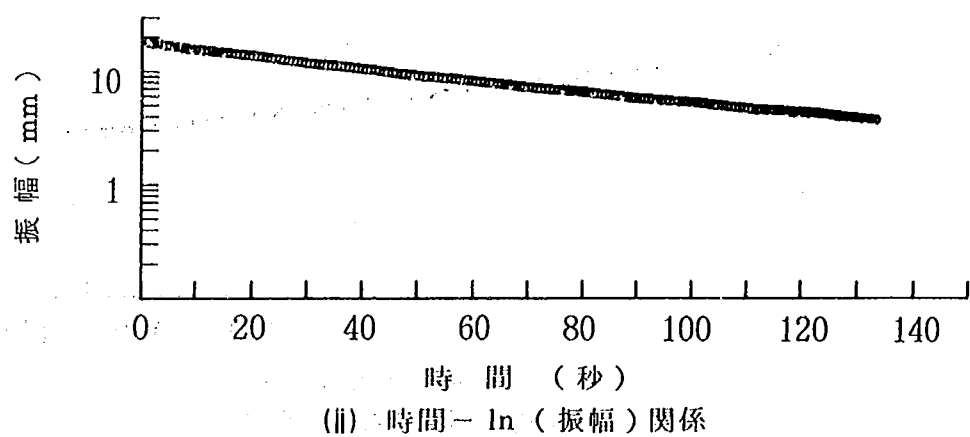
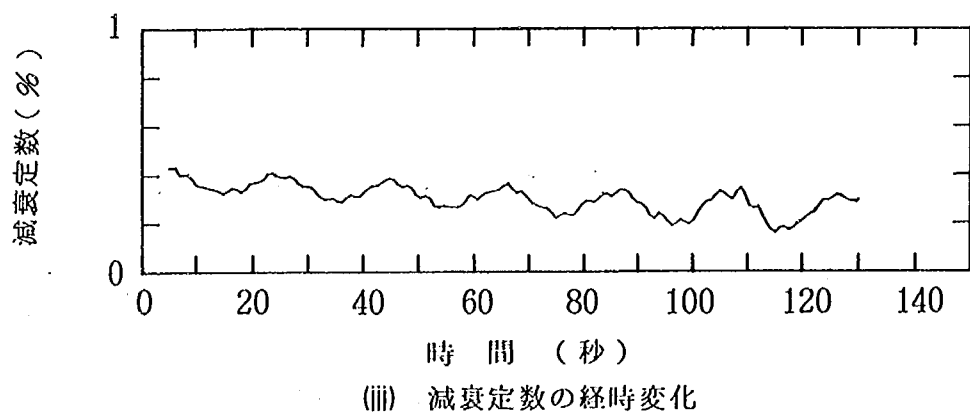
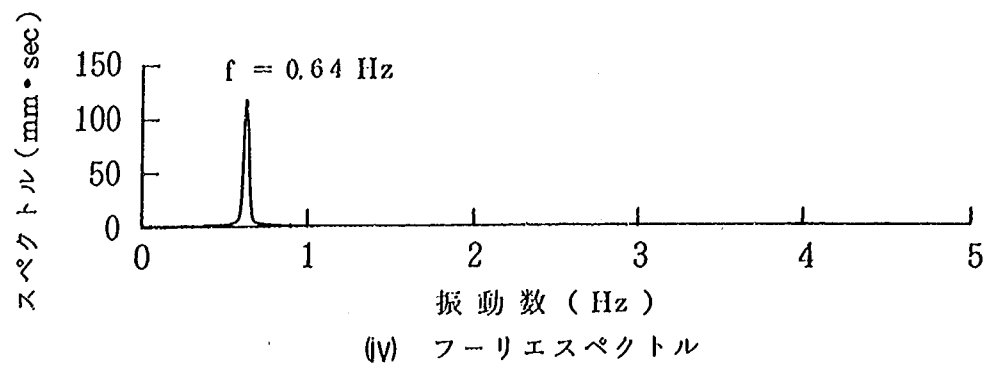


図 5.2 d) フェン形式 3 段鉛直方向加振(1)

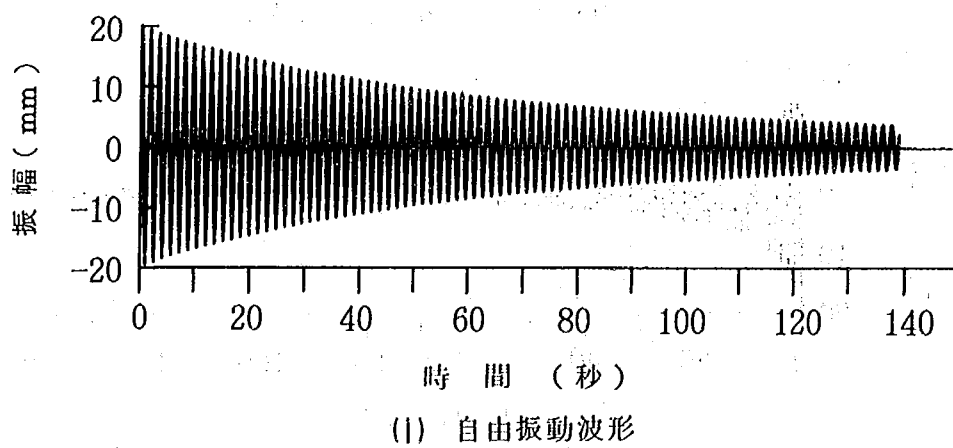
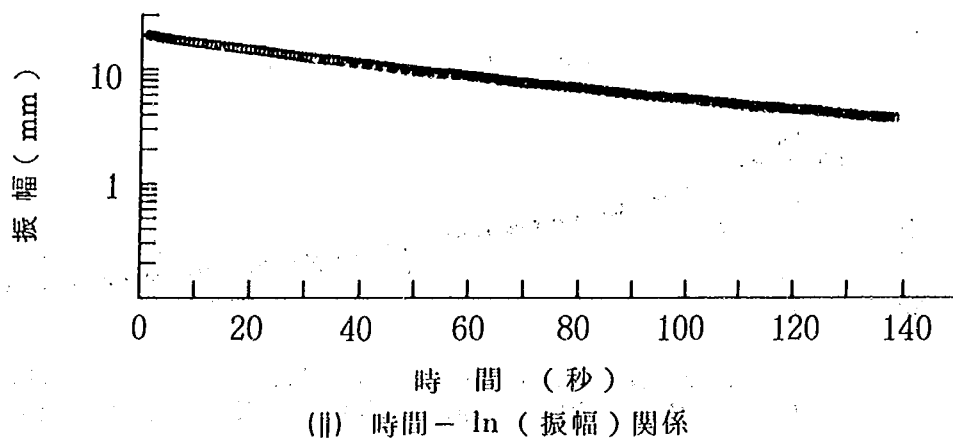
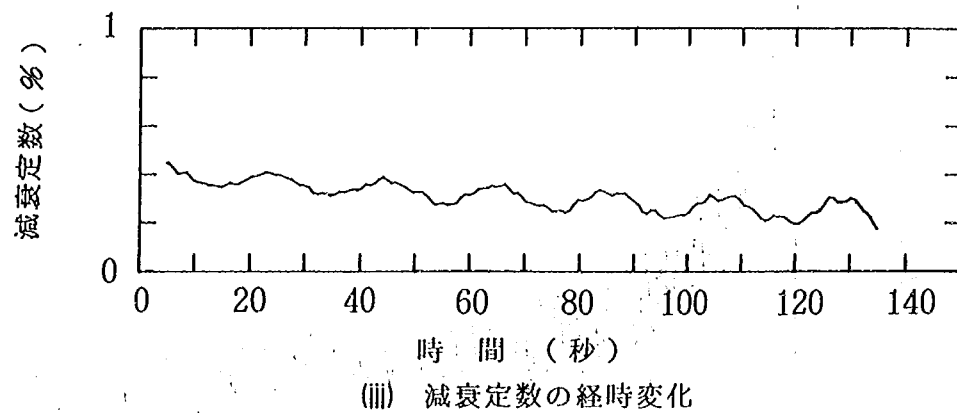
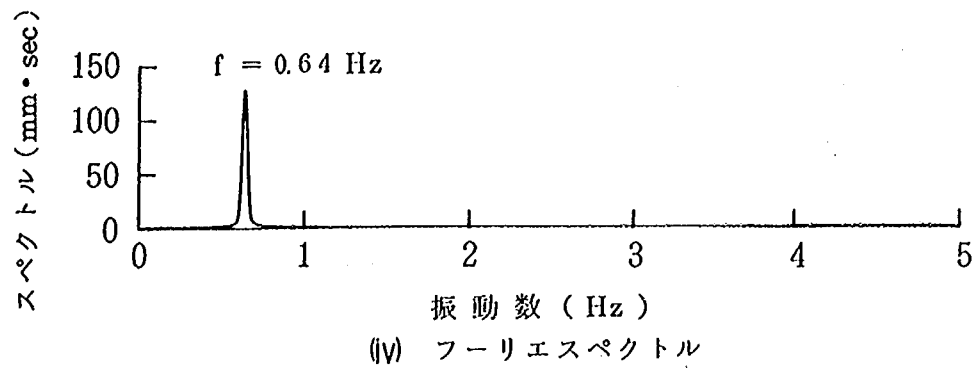
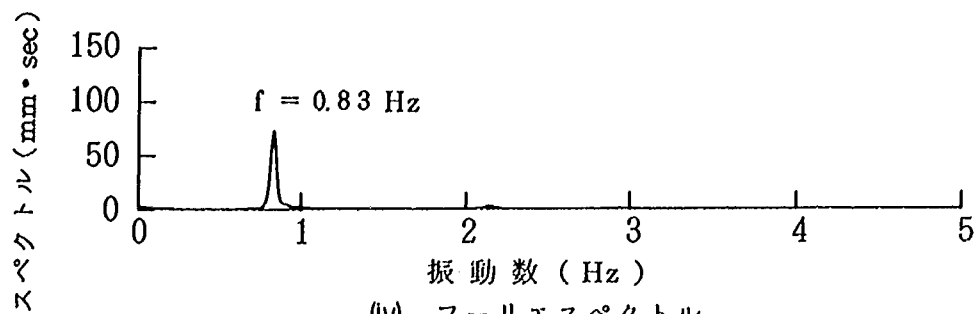
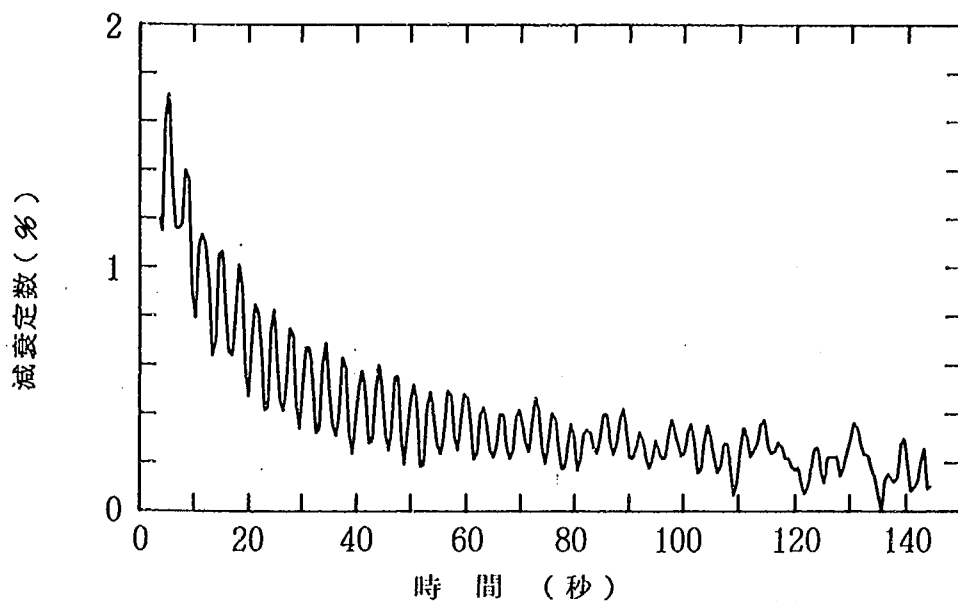


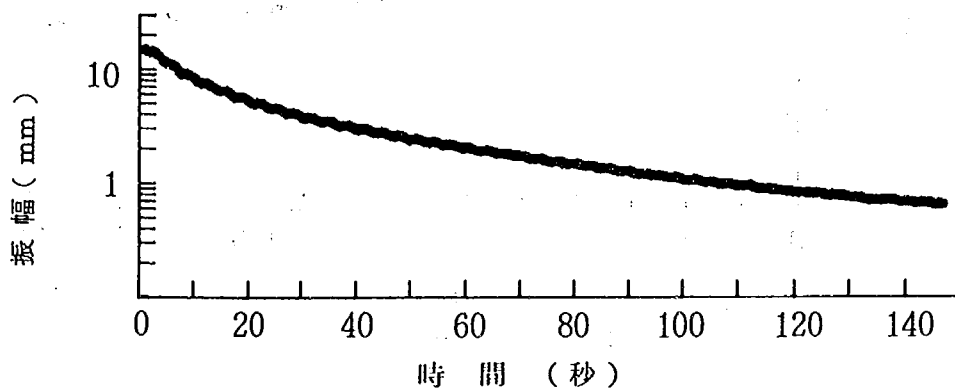
図 5.2 d) ファン形式 3 段鉛直方向加振 (2)



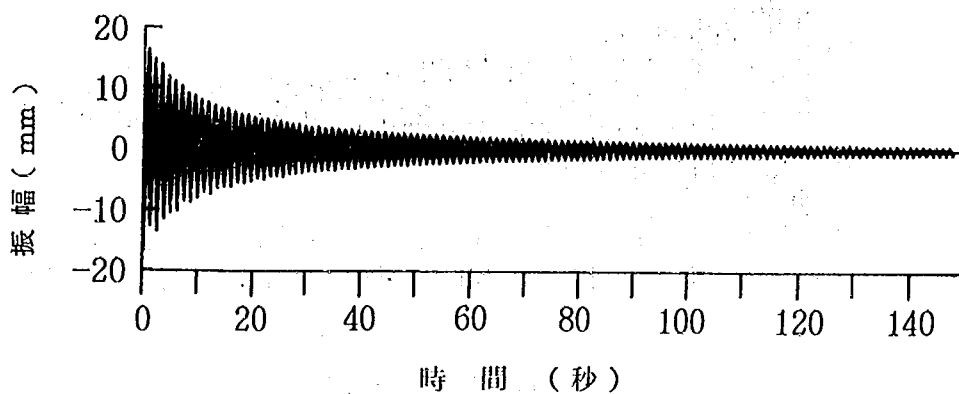
(v) フーリエスペクトル



(iii) 減衰定数の経時変化



(ii) 時間 - $\ln$ (振幅) 関係



(i) 自由振動波形

図 5.2 e) ハープ形式 2 段橋軸方向加振 (1)

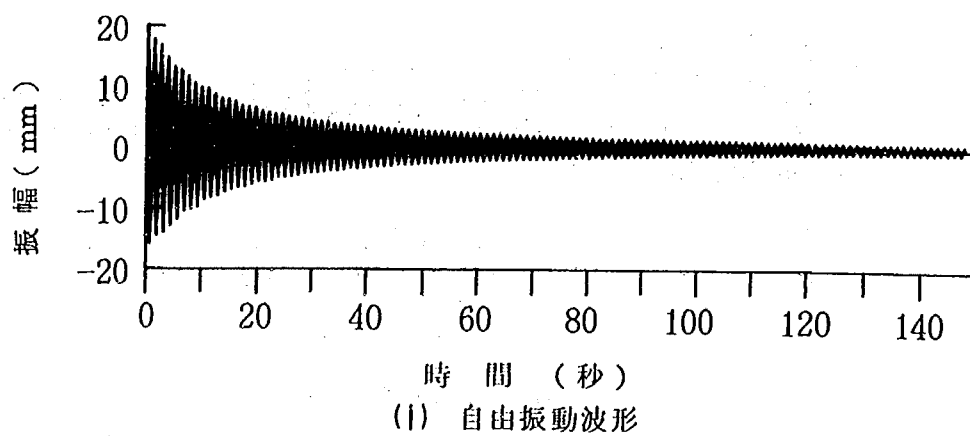
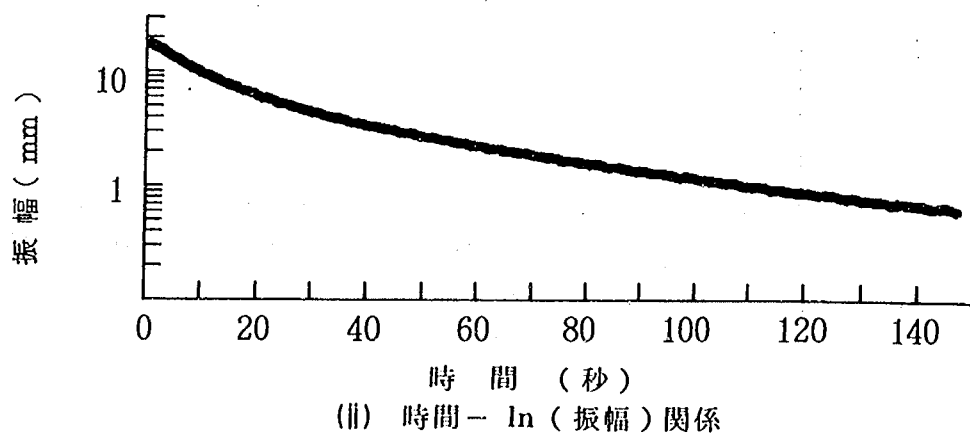
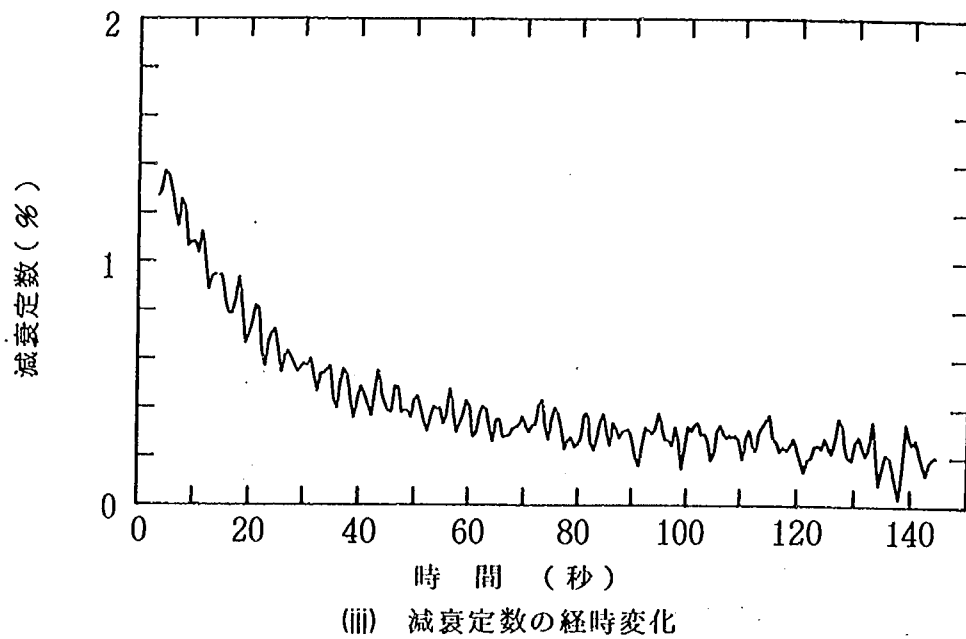
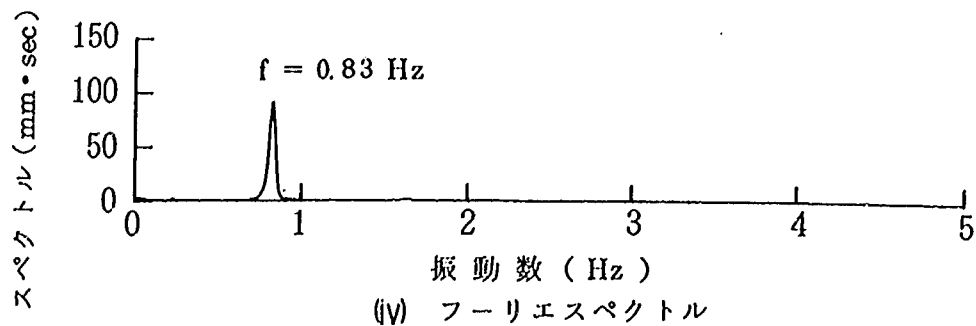


図 5.2 e) ハープ形式 2 段橋軸方向加振(2)

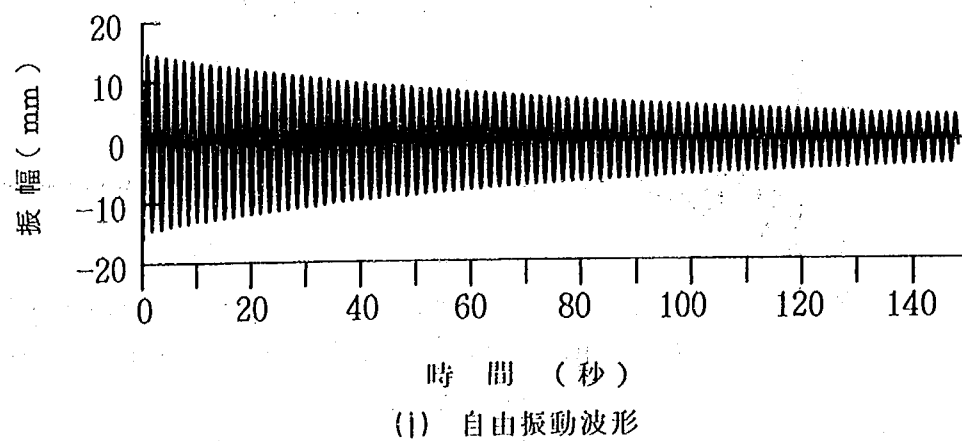
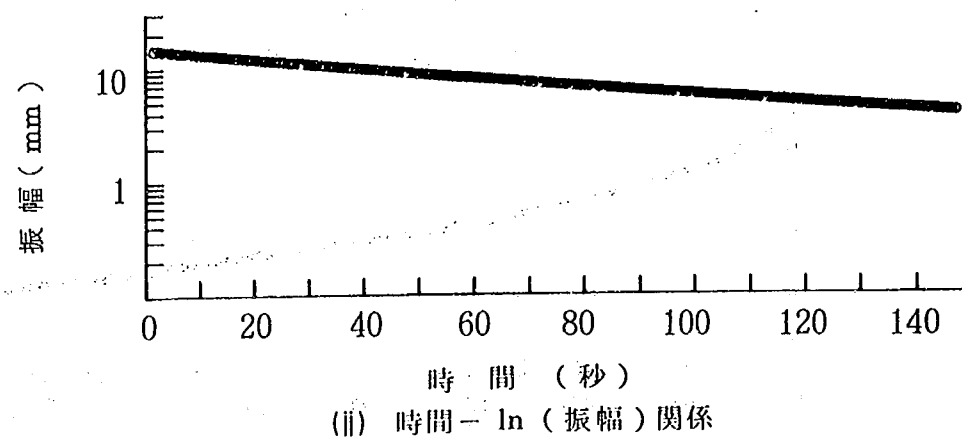
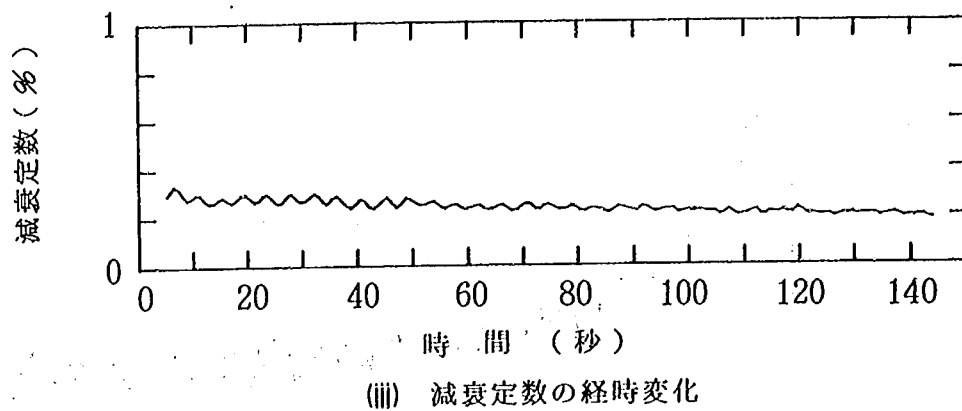
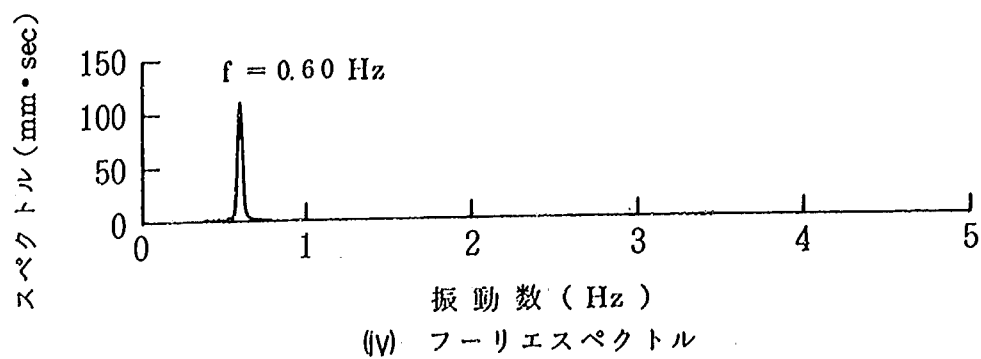
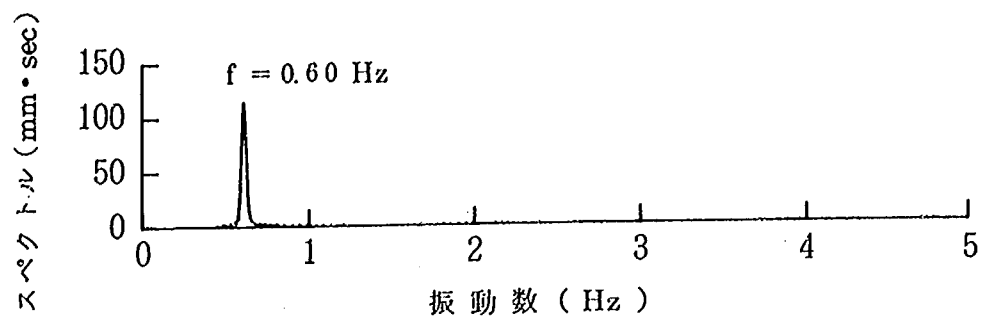
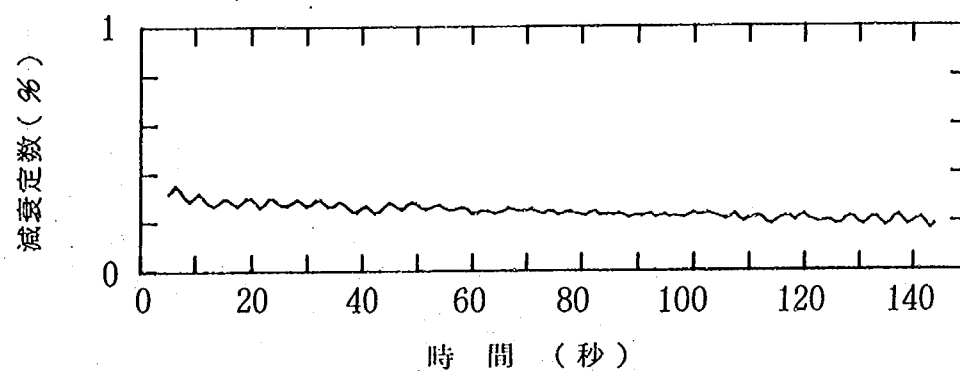


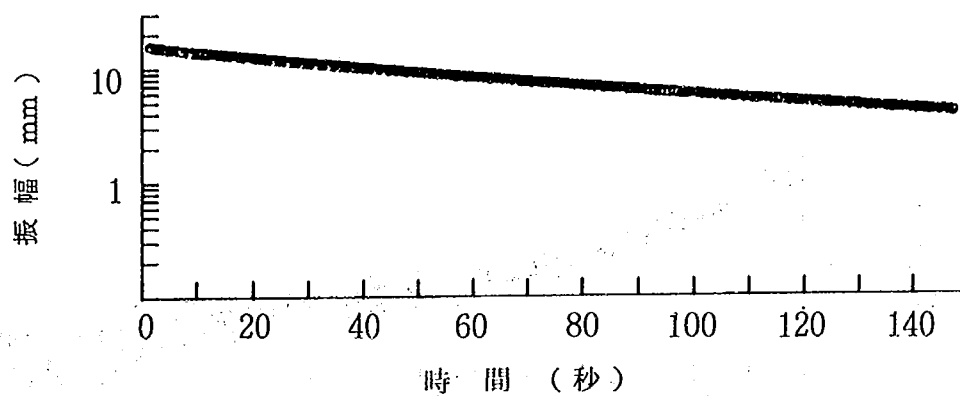
図 5.2 f) ハープ形式 2 段鉛直方向加振(1)



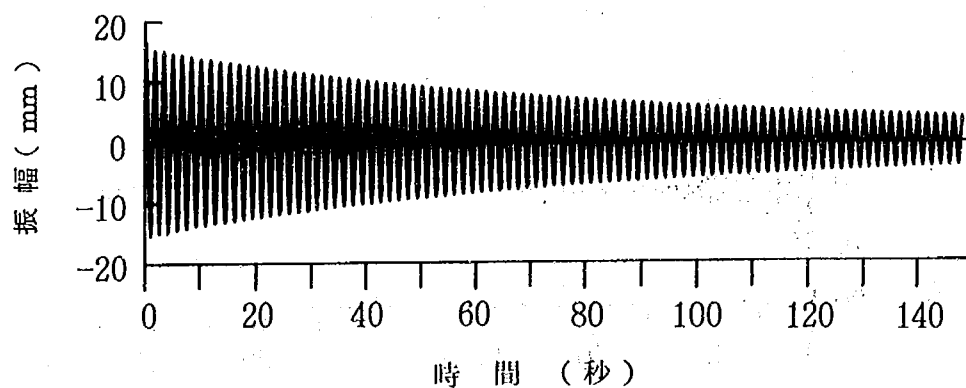
(IV) フーリエスペクトル



(III) 減衰定数の経時変化

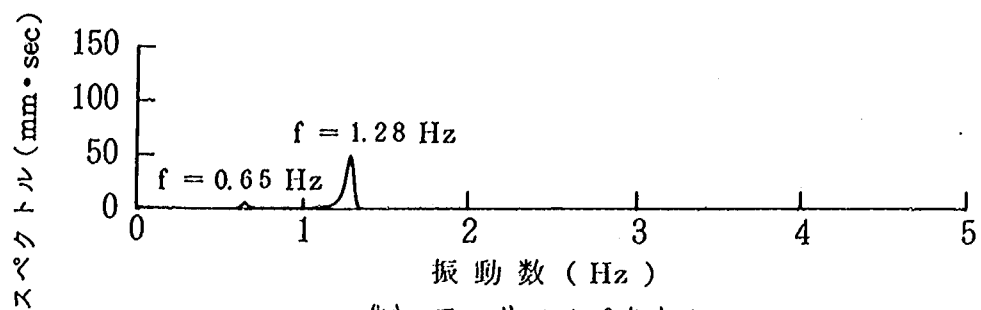


(II) 時間 - $\ln$ (振幅) 関係

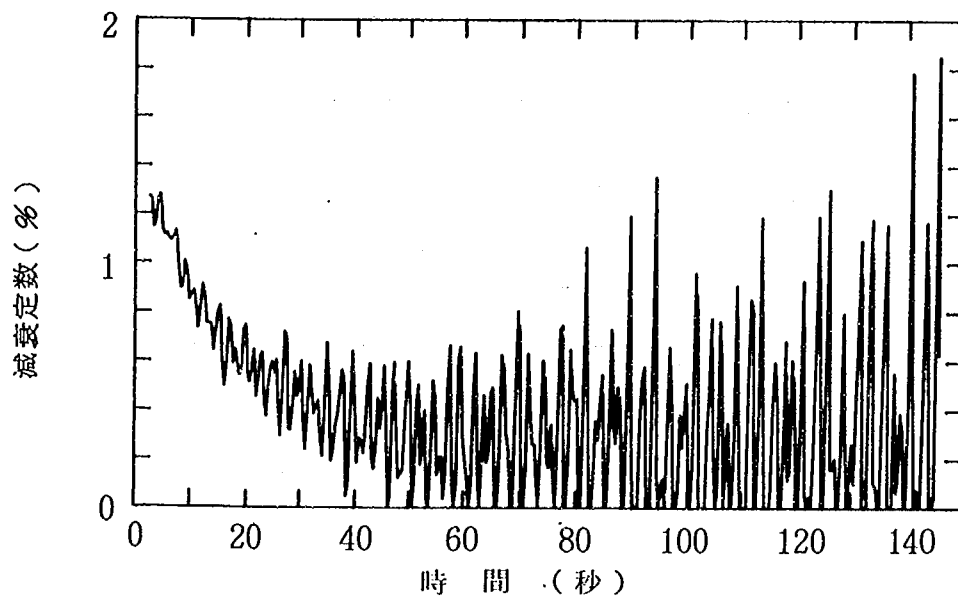


(I) 自由振動波形

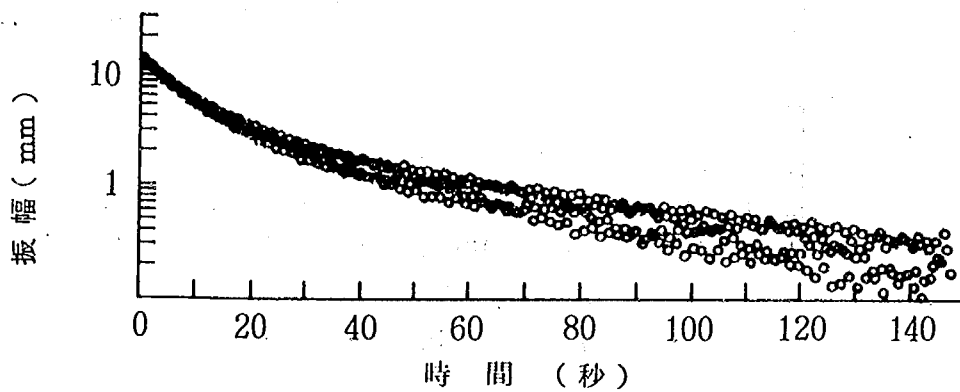
図 5.2 f) ハーブ形式 2 段鉛直方向加振 (2)



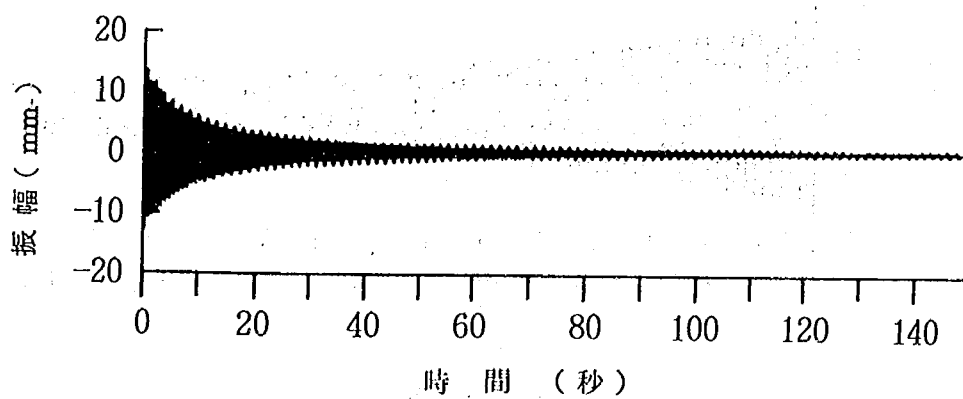
(v) フーリエスペクトル



(iii) 減衰定数の経時変化



(ii) 時間 - $\ln$ (振幅) 関係



(i) 自由振動波形

図 5.2 g) ハープ形式 3 段橋軸方向加振(1)

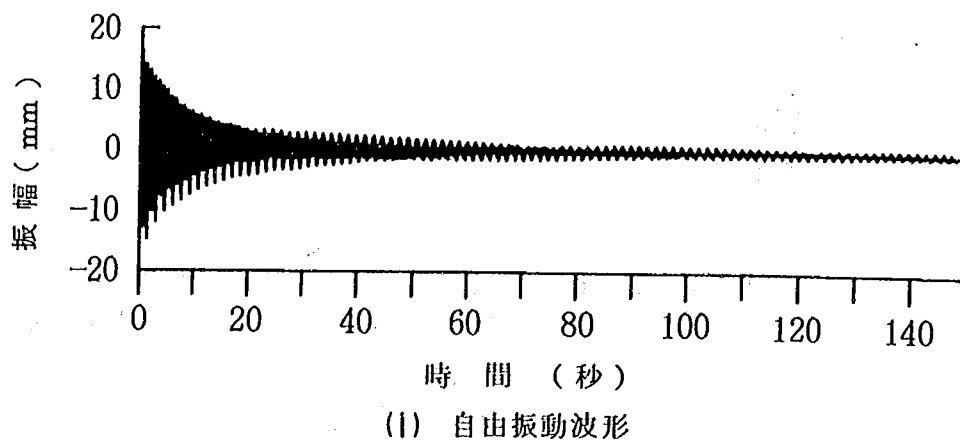
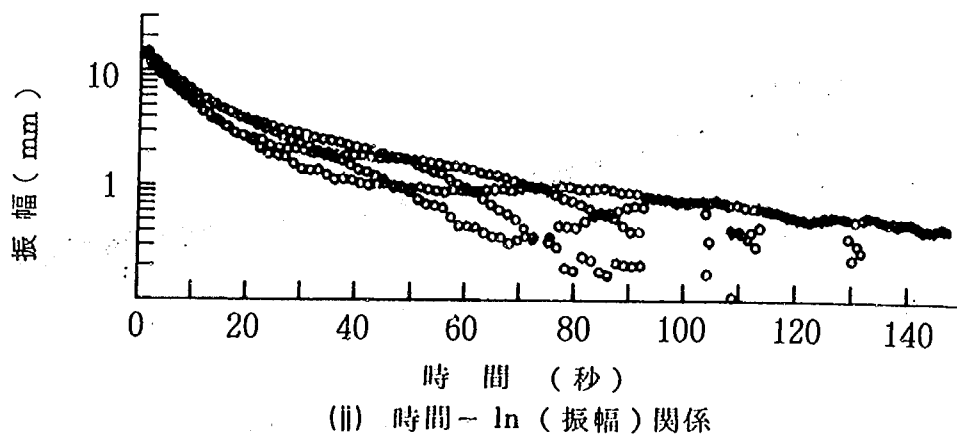
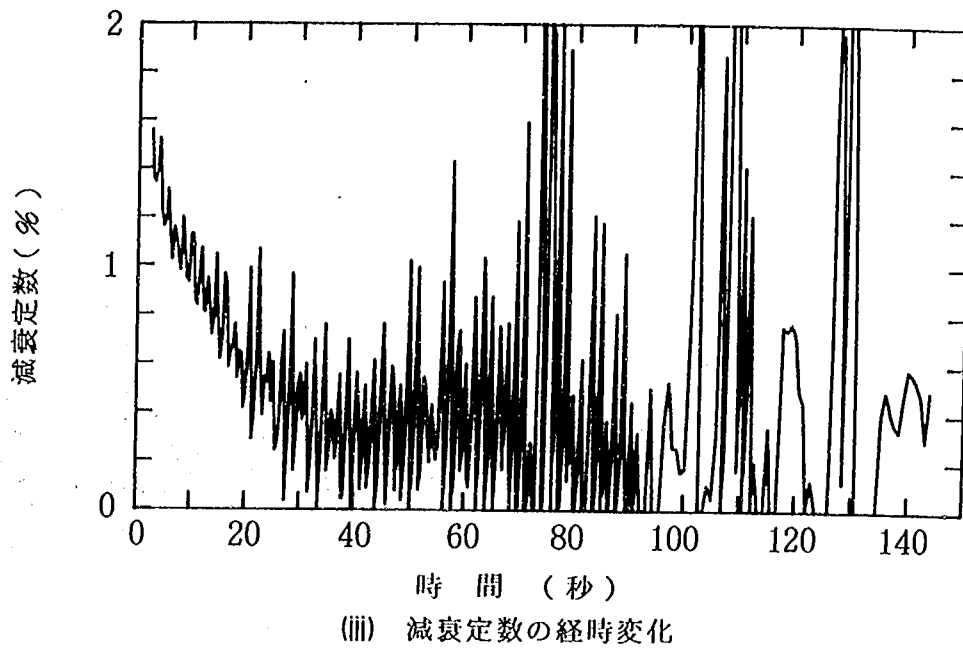
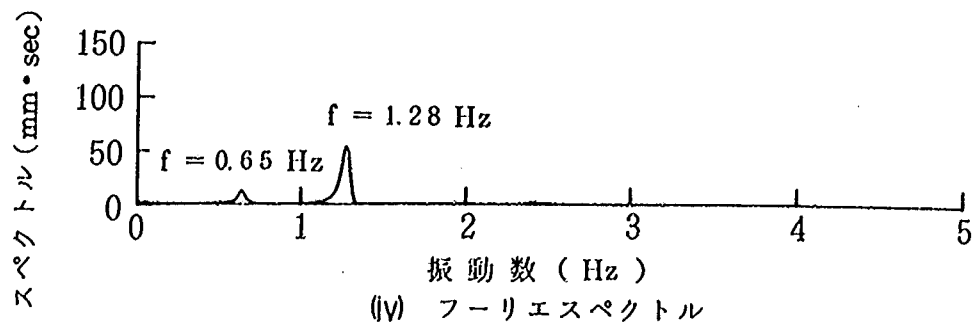


図 5.2 g) ハープ形式 3 段橋軸方向加振(2)

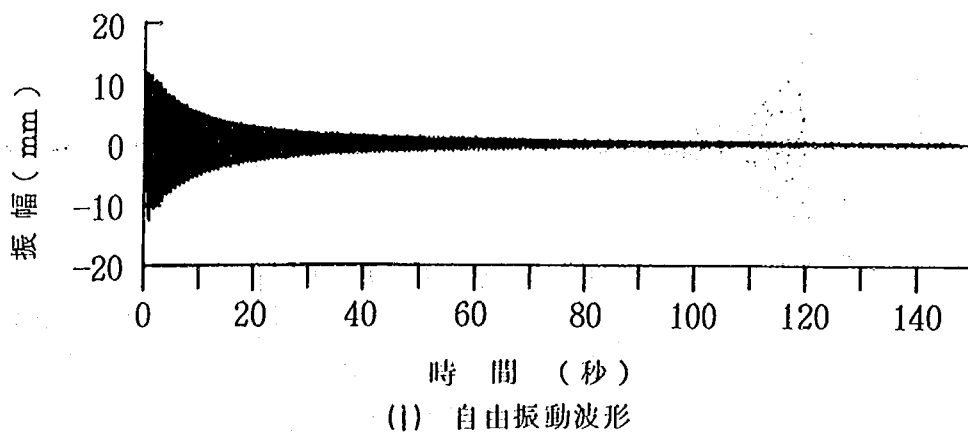
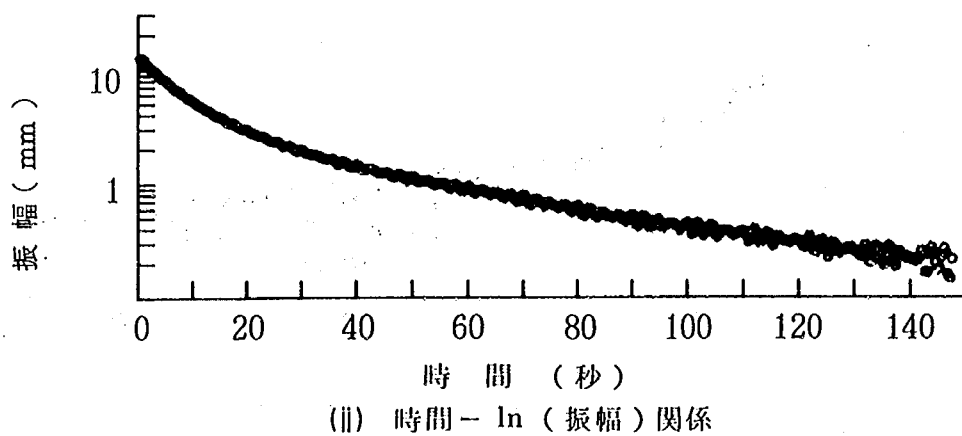
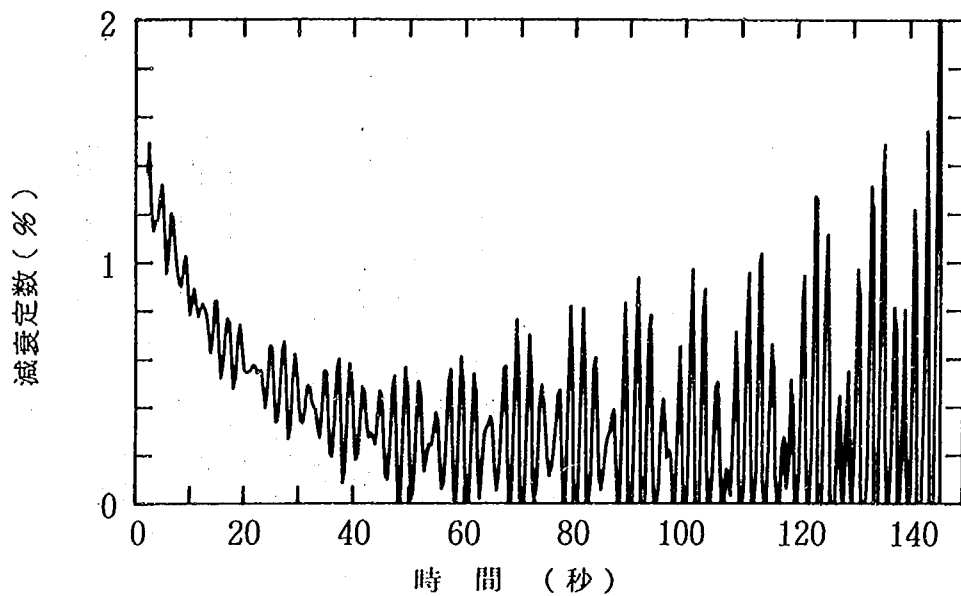
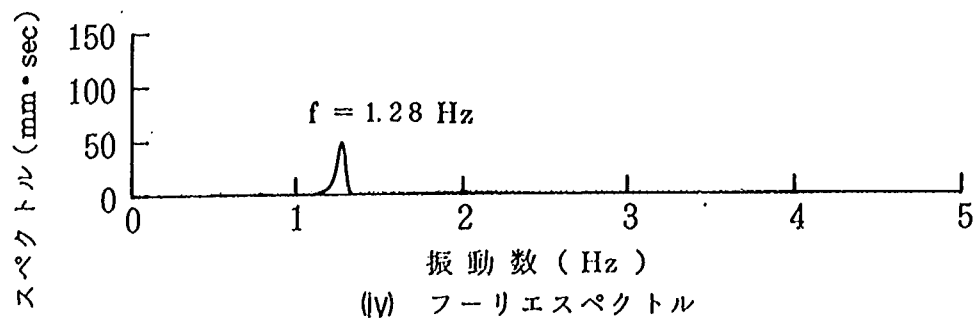


図 5.2 g' ハープ形式 3 段橋軸方向加振(1)

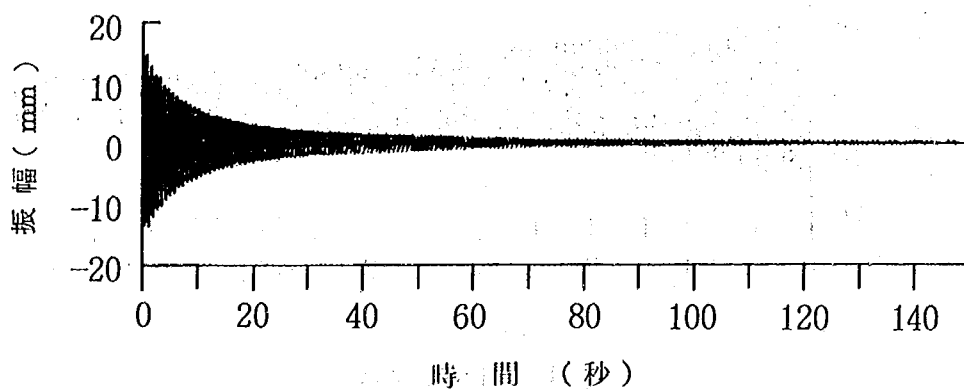
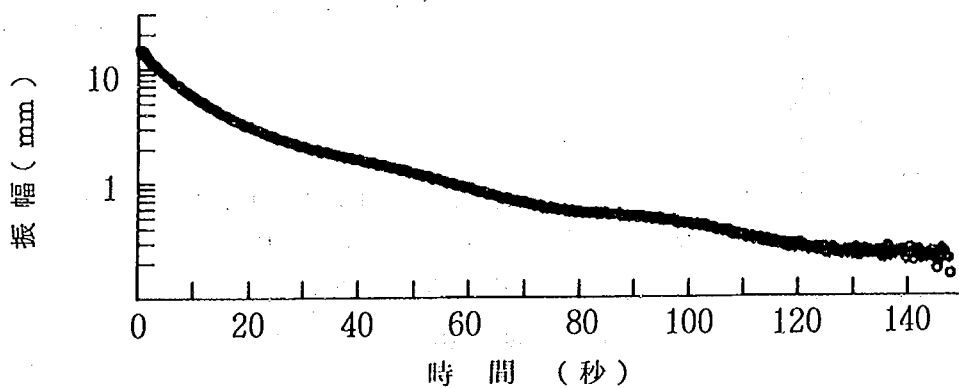
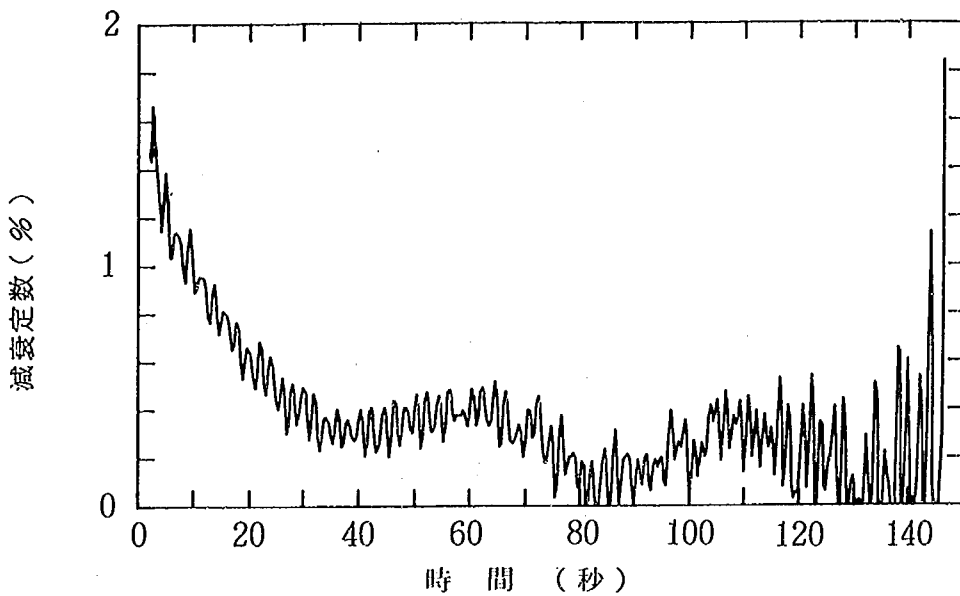
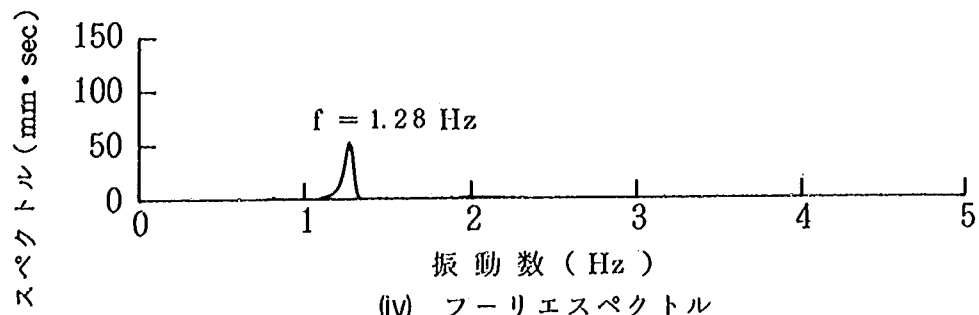


図 5.2 g') ハープ形式 3 段橋軸方向加振(2)

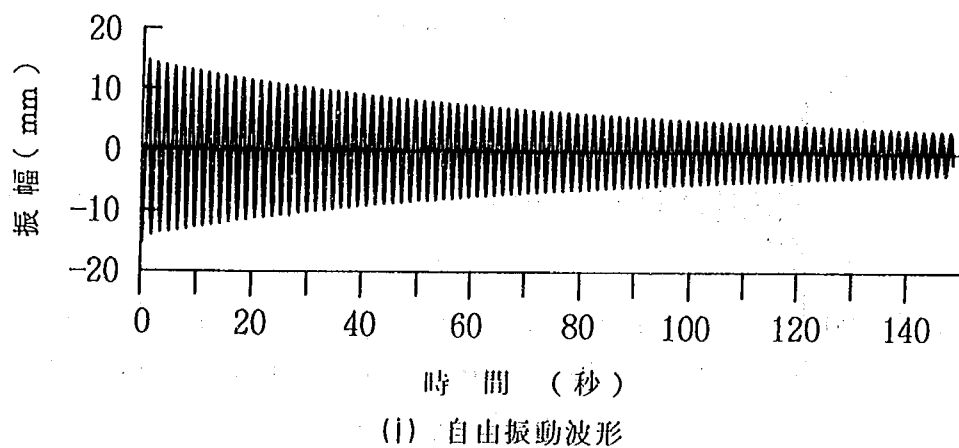
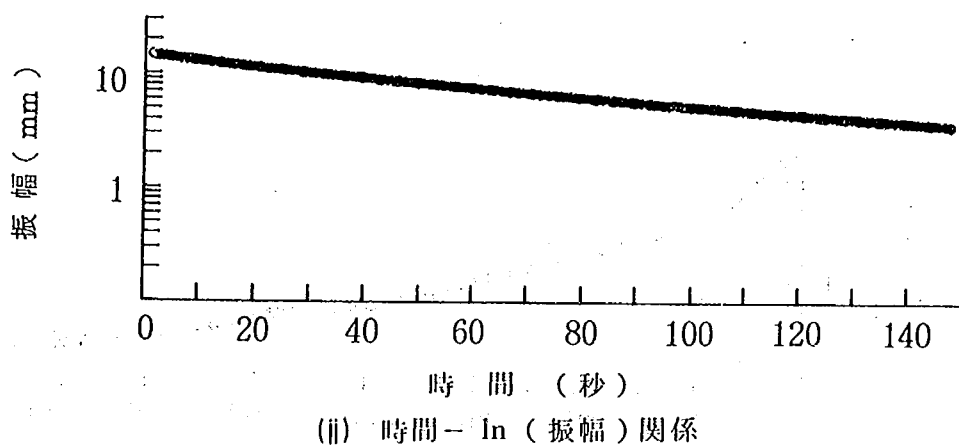
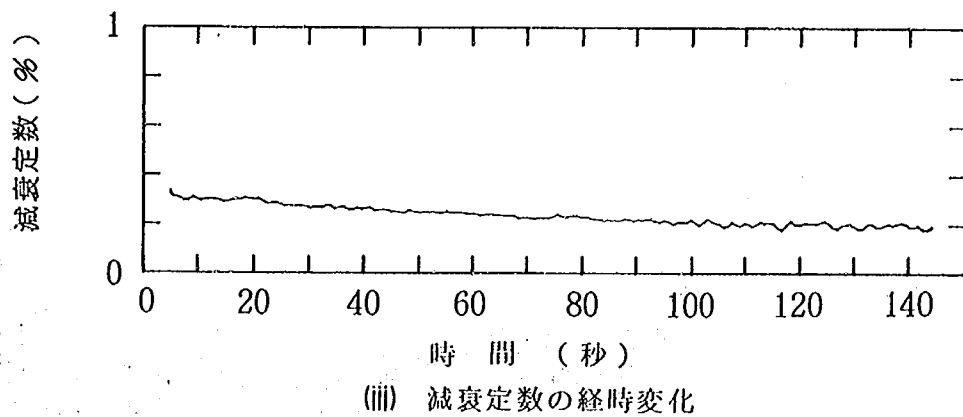
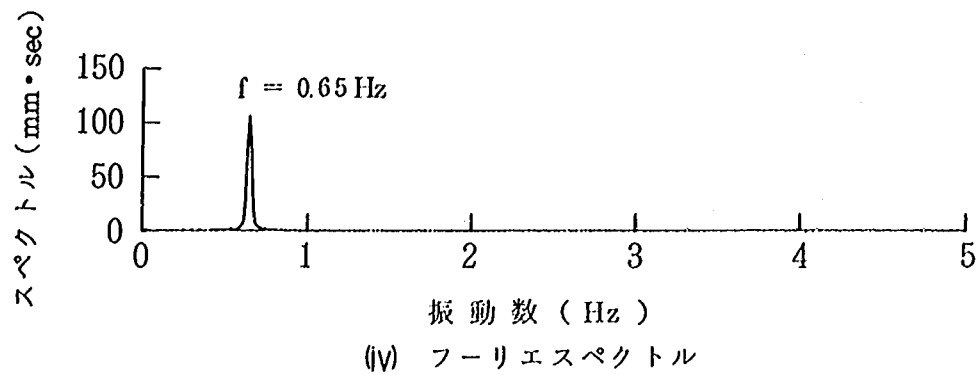
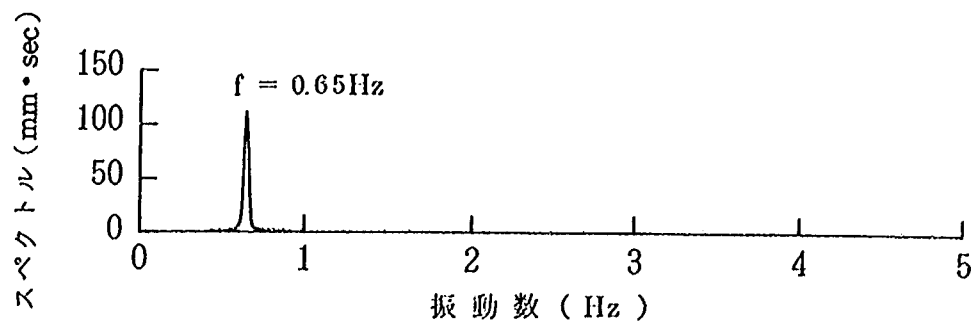
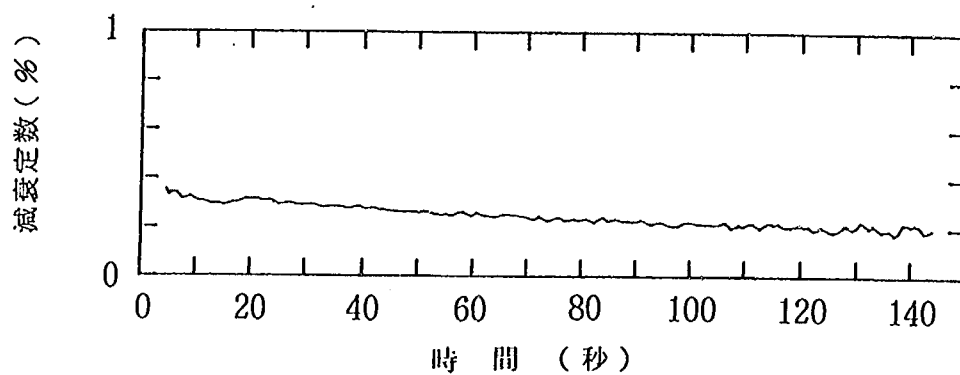


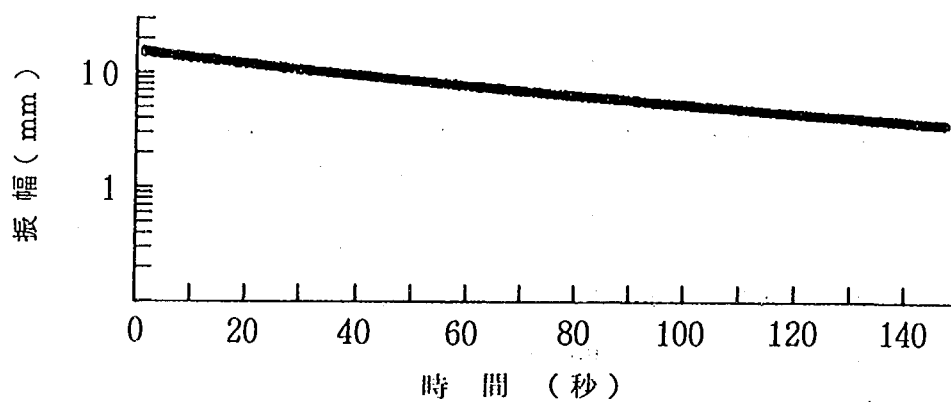
図 5.2 h) ハープ形式 3 段鉛直方向加振(1)



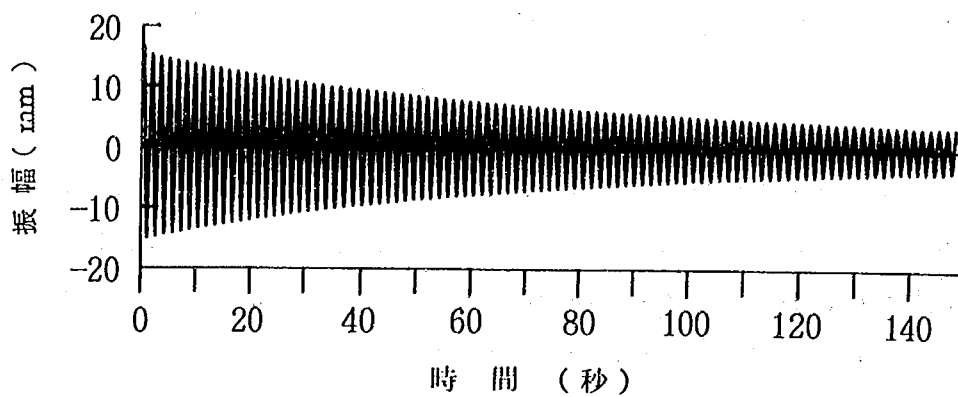
(iv) フーリエスペクトル



(iii) 減衰定数の経時変化



(ii) 時間 - $\ln$ (振幅) 関係



(i) 自由振動波形

図 5.2 h) ハープ形式 3 段鉛直方向加振(2)

6. 斜張橋の減衰特性

(1) 減衰定数に及ぼす振動方向の影響

図 6.1 に各実験ケースにおける振動振幅と減衰定数の関係を示す。ここで、静止位置から+側に加振した場合と-側に加振した場合の両者の結果を示している。これより、橋軸方向加振の方が鉛直方向加振に比べて減衰定数が大きいことがわかる。特に後述する振動振幅の影響に関連して、ハープ形式の場合には、振動振幅が 10 mm 程度以上になると振動振幅の増加につれてこの傾向は顕著になる。

(2) 減衰定数に及ぼす振動振幅の影響

図 6.1 によると、すべての実験ケースにおいて、かなり変動はあるものの、減衰定数は振動振幅に比例して増加していることがわかる。また、その増加の割合は、実験ケースおよび加振方向で異なり、特に、ハープ形式の橋軸方向加振の場合に著しい。

減衰定数の振動振幅依存性を表わすために、減衰定数が振動振幅に線形比例するものと仮定して、式 (6.1) より両者の関係を線形回帰した。

$$h = C_1 + C_2 \bar{u} \quad (6.1)$$

ここで、 h : 減衰定数 (%)

$\bar{u}$: 無次元化した振動振幅で次式で求める (%)

$$\bar{u} = u / L \times 100 \quad (6.2)$$

u : 振動振幅 (mm)

L : 橋長 (= 5,050 mm)

C_1, C_2 : 係数

上述したように、加振は静止位置から+側と-側の両方向に行っているため、ここでは両者のデータをともに用いて回帰した。この結果を表 6.1 に示す。これより以下の事項が指摘される。

1) ハープ形式の橋軸方向加速の場合を除けば、式 (6.1) の係数 C_2 は 0.5 ~ 0.8 程度の値をとる。ハープ形式の橋軸方向加振の場合には、これより 1 オーダー大きく 5.0 ~ 6.0 となる。

2) 式 (6.1) から、もし係数 C_1 が $\bar{u} = 0$ の時の減衰定数 (%) を表わしていると考えることができるならば、振動振幅が 0 の時の減衰定数は 0.14 ~ 0.31 % 程度の値をとる。実験ケース数が少ないためはっきりしないが、この値からだけでは、ケーブル形式、ケーブル段数による顕著な違いは認められない。表 6.2 は、式 (6.1) を用いて、無次元化した振動振幅 $\bar{u} = 0.05$ % ($u = 2.5$ mm), 0.02 % ($u = 1.0$ mm) および 0.01 % ($u = 0.5$ mm) に相当する減衰定数を計算した結果である。今回の模型振動実験から求めた減衰定数と無次元化し

た振動振幅の関係が、実橋にも適用できるかどうかは問題であり、今後の検討の必要があるが、もし適用可能であるとすれば、無次元化した振動振幅が0.01%の場合には、減衰定数は橋軸方向には0.2～0.3%、鉛直方向には0.1～0.2%程度の値をとる。

以上より、斜張橋においては、振幅の大きな領域における減衰定数は、振幅の小さな領域における減衰定数より大きな値となると言える。しかし、その増加の度合は、斜張橋の形状、振動方向によって異なってくる。

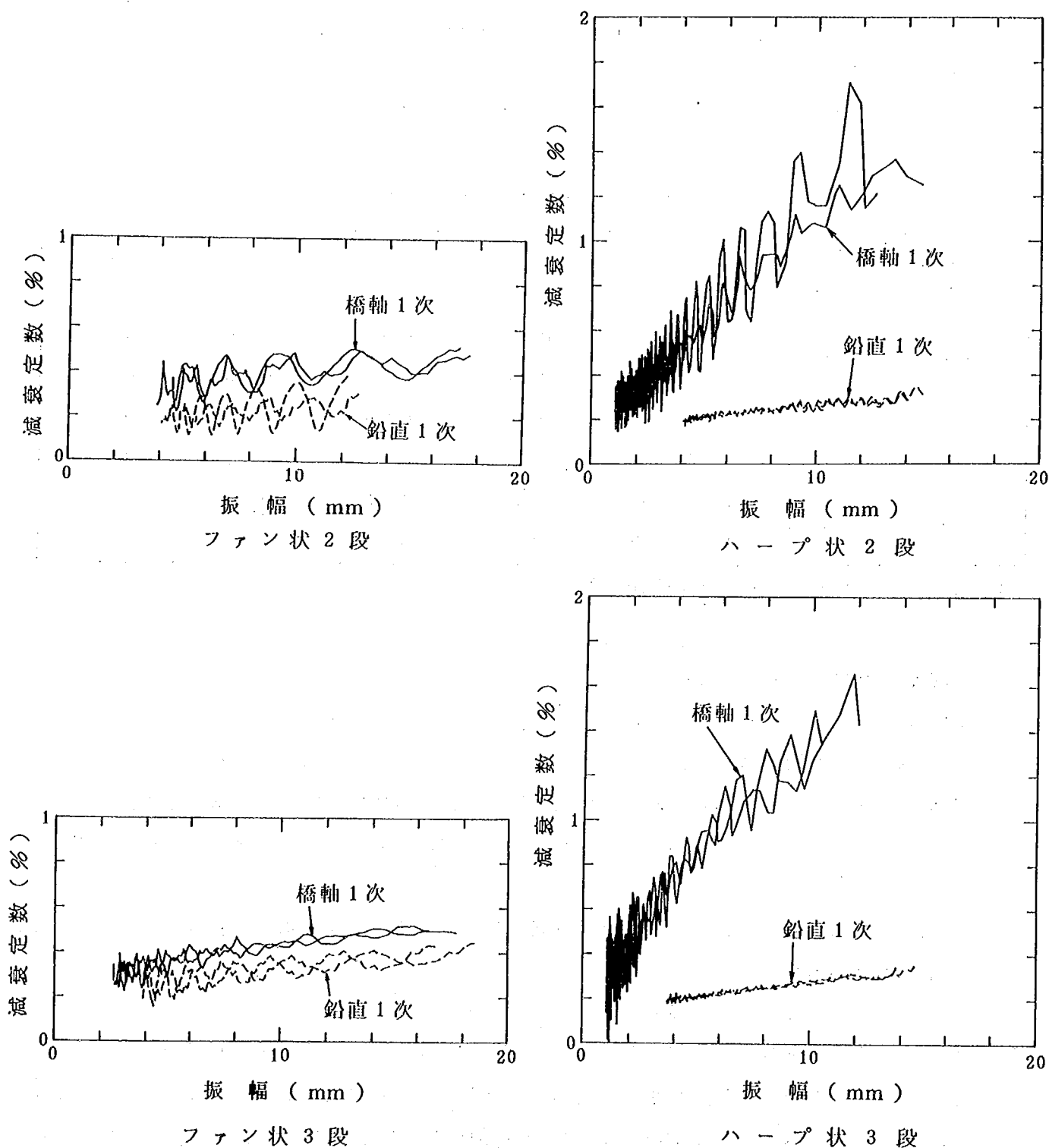


図 6.1 減衰定数に及ぼす振動方向の影響

表 6.1 式 (6.1) の係数 C_1 及び C_2

加振方向	ケーブル形式 ケーブル段数	ファン形式		ハープ形式	
		2 段	3 段	2 段	3 段
橋軸方向	C_1	0.309	0.275	0.152	0.183
	C_2	0.489	0.766	4.953	6.246
鉛直方向	C_1	0.139	0.203	0.162	0.146
	C_2	0.517	0.587	0.513	0.644

表 6.2 式 (6.1) により求めた減衰定数 (%)

振動振幅 (mm)	無次元化 ¹⁾ した 振動振幅 (%)	振動方向	ファン形式		ハープ形式	
			2 段	3 段	2 段	3 段
2.5	0.05	橋 軸	0.33	0.31	0.40	0.50
		鉛 直	0.16	0.23	0.19	0.18
1.0	0.02	橋 軸	0.32	0.29	0.25	0.31
		鉛 直	0.15	0.21	0.17	0.16
0.5	0.01	橋 軸	0.31	0.28	0.20	0.25
		鉛 直	0.14	0.21	0.17	0.15

1) 振動振幅 / 橋長 (橋長 = 5,050 mm)

(3) 減衰定数に及ぼすケーブル形式の影響

図 6.2 はケーブル形状が減衰定数に与える影響を示すものである。

- 1) 橋軸方向振動の場合には、ケーブル形式により減衰定数の振幅依存性が大きく異なる。これについては前述した通りである。振動振幅の小さい領域においては、減衰定数はケーブル形式によりあまり違いがないが、振幅が大きい領域においては減衰定数による違いが顕著になる。
- 2) 鉛直方向振動の場合には、ケーブル形式の影響は、その値及び振幅依存性の両方において、ともに認められない。

(4) 減衰定数に及ぼすケーブル段数の影響

図 6.3 はケーブル段数が減衰定数に与える影響を示すものである。これによれば、ケーブル段数が減衰定数に与える影響は小さいとすることができる。ただし、式 (6.1) によると、振幅依存性の度合を表わす係数 C_2 は、橋軸方向に加振した場合、ファン形式では 0.489 (2 段) → 0.766 (3 段) , ハープ形式では 4.953 (2 段) → 6.246 (3 段) , また鉛直方向に加振し

た場合、ファン形式では0.517 (2段) → 0.587 (3段), ハープ形式では0.513 (2段) → 0.644 (3段), いずれも2段張よりも3段張の方が10~60%大きくなっている。

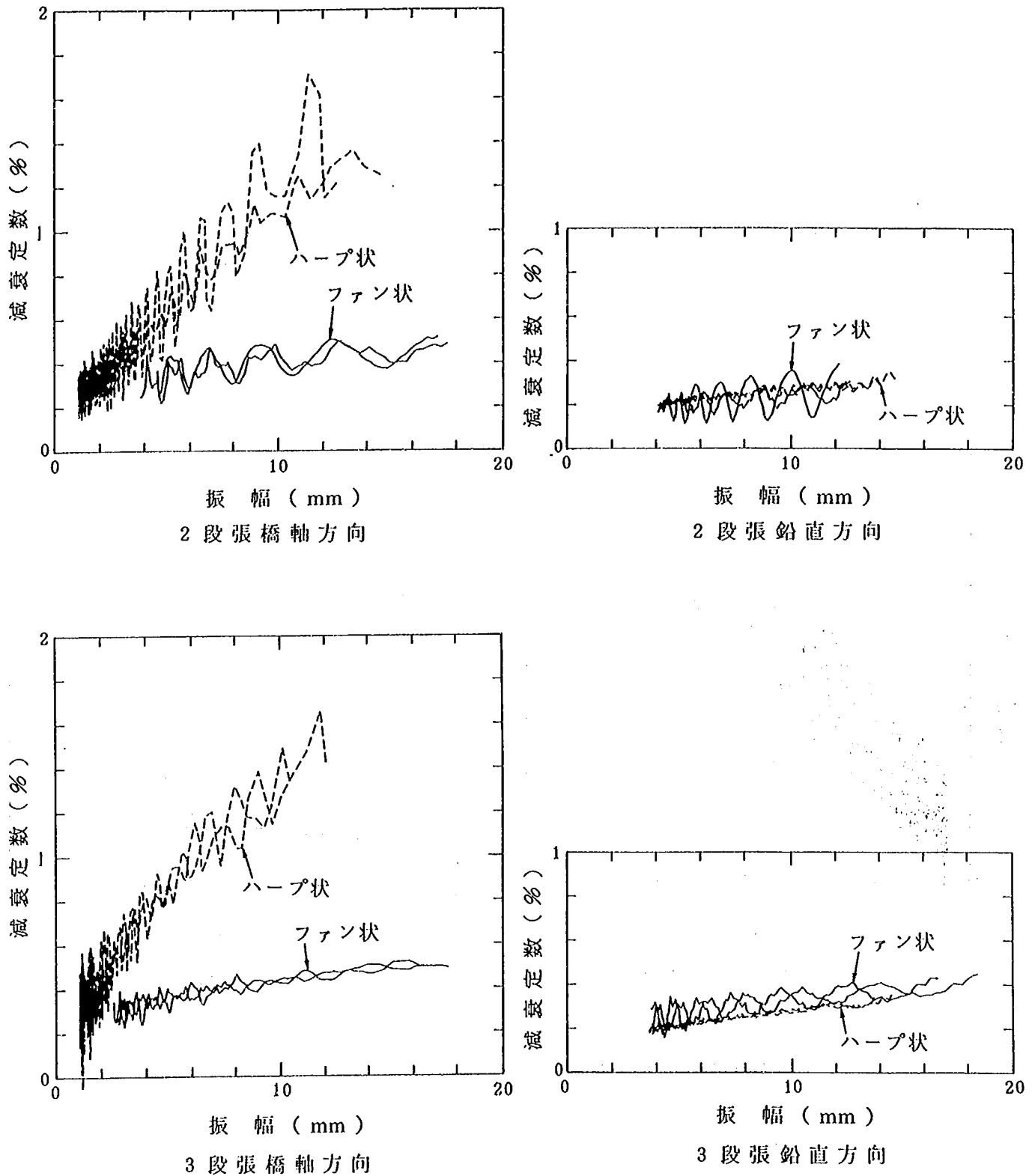


図 6.2 減衰定数に及ぼすケーブル形状の影響

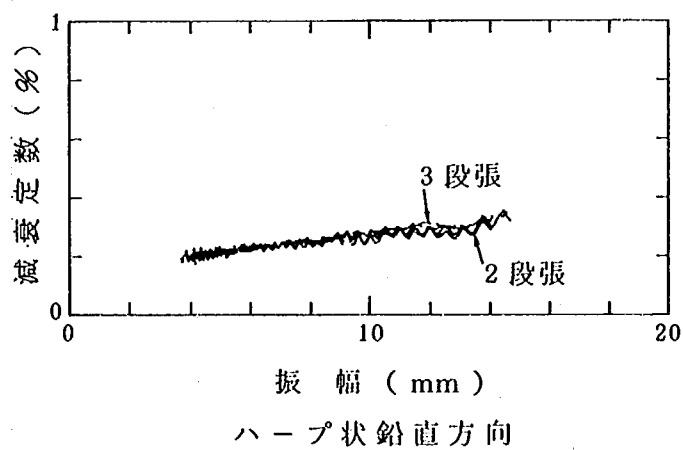
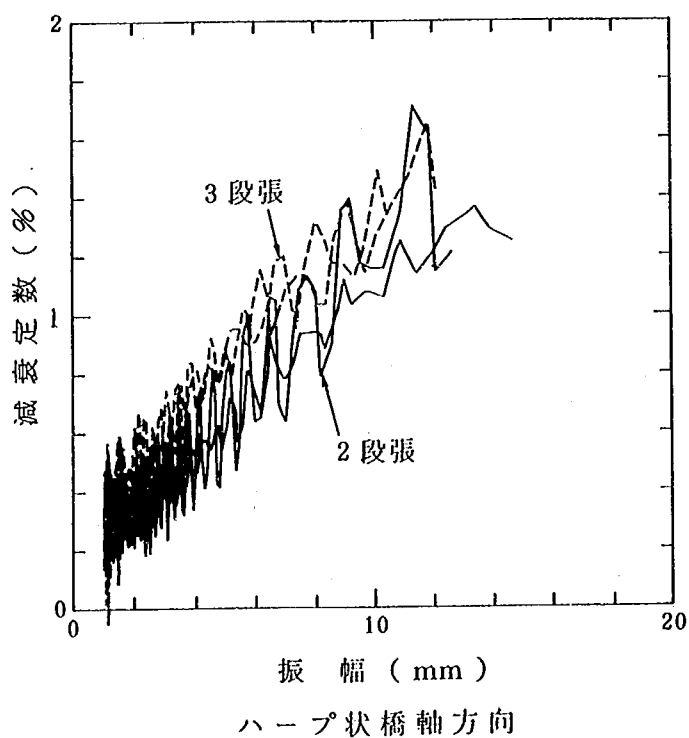
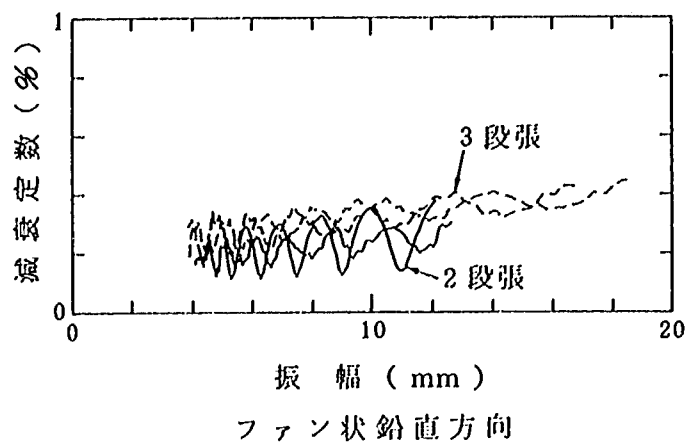
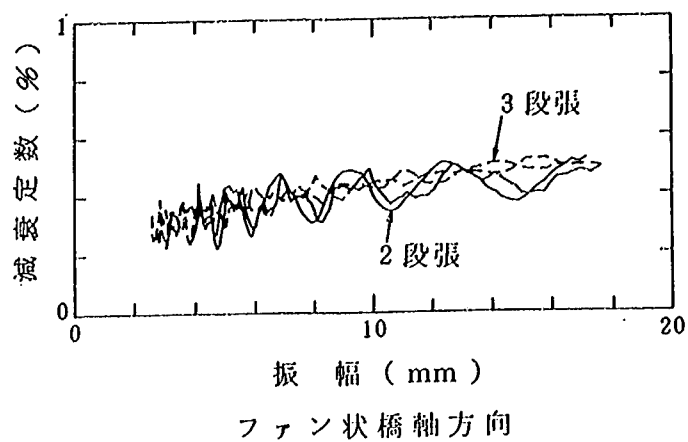


図 6.3 ケーブル形状に及ぼすケーブル段数の影響

7. 結 論

本報告は、斜張橋の設計自由度の1つである、ケーブル形式およびケーブル段数が斜張橋の減衰特性にどのような影響を与えるか、ケーブルのみで支持された斜張橋を対象として、模型振動実験により検討したものである。最初の実験であり、また実橋に比較すると振動振幅の大きい領域での実験に相当する、実験ケース数が十分ではない等の制約があるが、本実験結果の範囲から、斜張橋の減衰特性についてわかった点をまとめると以下ようになる。

- (1) 今回のように、橋長に比較して振動振幅の大きな振動においても、離散系骨組構造モデルにより、固有振動特性を正しく推定することができる。ただし、このためにはケーブルによる振子運動の影響及び軸力の影響による幾何剛性を正しく考慮する必要がある。
- (2) 式(6.1)で与えられる正の振動振幅依存性がある。振動振幅依存性を係数 C_2 によって表わすと、ハープ形式を橋軸方向に加振した場合には、これ以外の場合に比較して1オーダー大きい。ただしこの理由が何であるかについては、今回の実験では検討しきれていない。¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾
- (3) ハープ形式を橋軸方向に加振した場合を除けば、その他の場合には減衰定数には基本的に大きな違いは認められない。今回の実験が有意な結果を示しているかどうかは、今後に検討の余地を残しているが、次のような傾向が認められる。
 - a) 橋軸方向に加振した場合の方が鉛直方向に加振した場合よりも減衰定数が大きい。これはケーブル形式及びケーブル段数によらない。
 - b) ケーブル段数が3段の場合の方が、2段の場合よりも減衰定数の振動振幅依存性が大きい。これは加振方向、ケーブル形式によらない。

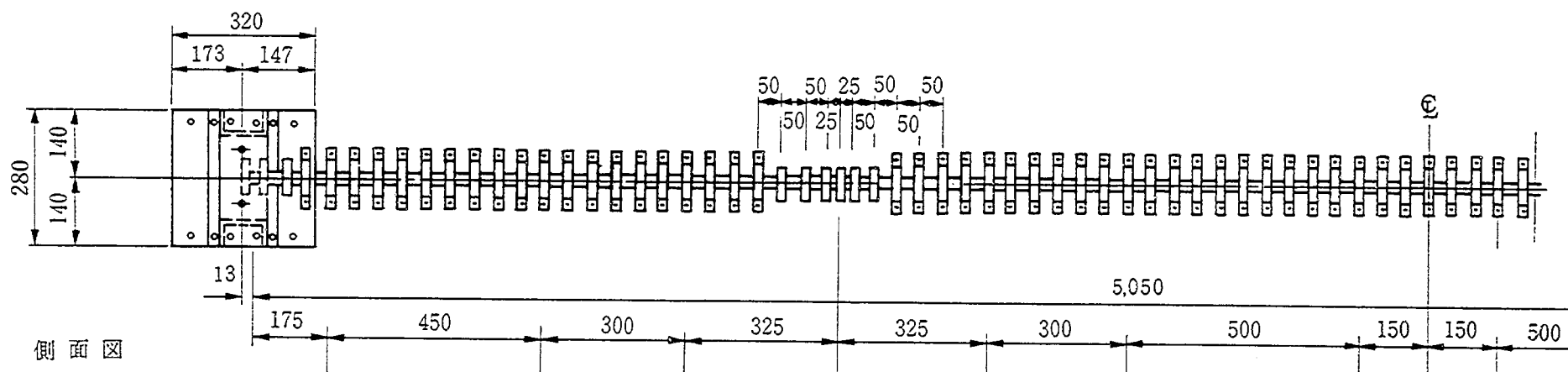
参 考 文 献

- 1) 川島一彦, 運上茂樹, 吾田洋一: 斜張橋の耐震性に関する研究 — (その1) 振動実験から見た斜張橋の振動特性 —, 土木研究所資料第2388号, 昭和61年6月
- 2) 川島一彦, 運上茂樹, 吾田洋一: 斜張橋の耐震性に関する研究 — (その2) 地震応答に及ぼす減衰定数の影響 —, 土木研究所資料第2489号, 昭和62年3月
- 3) 川島一彦, 運上茂樹, 吾田洋一: 強震記録に基づく斜張橋の振動特性, 第19回地震工学研究発表会講演概要, 1987. 7
- 4) 川島一彦, 運上茂樹, 吾田洋一: 斜張橋の耐震性に関する研究 — (その3) 支承部の摩擦に伴う斜張橋の減衰特性 —, 土木研究所資料第2631号, 昭和63年5月
- 5) 伊藤 学, 片山恒雄: 橋梁構造の振動減衰, 土木学会論文集第117号, 昭和40年5月
- 6) 伊藤 学: 橋梁上部構造の振動減衰, 九州橋梁構造研究会土木構造, 材料論文集第1号, 1986年1月
- 7) 川島一彦, 運上茂樹, 吾田洋一: 下部工からの逸散減衰による斜張橋の減衰特性, 第19回地震工学研究発表会講演概要, 1987. 7
- 8) 前田幸雄, 前田研一, 越後 滋: 斜張橋のシステムダンピングに関する2, 3の考察, 土木学会論文報告集第333号, 1983年5月
- 9) 川島一彦, 運上茂樹, 吾田洋一, 久保明英: 模型実験による斜張橋の振動特性の検討, 第19回地震工学研究発表会講演概要, 1987. 7
- 10) 久保明英, 川島一彦, 運上茂樹, 吾田洋一: 斜張橋の減衰特性に関する模型実験, 土木学会第42回年次学術講演会講演概要集第1部, 1987. 9
- 11) 例えば日本道路公団: 名港西大橋工事誌, 昭和61年3月など
- 12) 財首都高速道路協会: 横浜港横断橋上部構造の設計施工に関する調査研究(その3) 報告書 昭和57年
- 13) 西岡 隆: 構造振動解析, 土木工学基礎シリーズ4, 培風館, 1987. 4
- 14) Vincent, G. S.: Discussion on "Structural Damping in Suspension Bridges", Trans. ASCE, Vol. 117, pp 196 ~ 203, 1952. 11
- 15) Kubo, K.: Aseismicity of Suspension Bridges Forced to Vibrate Longitudinally, Proc. 2nd WCEE, Vol. 2, pp 913 ~ 929 1960. 7 Tokyo and Kyoto, Japan
- 16) Ohlsson, S.: Modal Testing of the Tjörn Bridge, Proc. 4th International Modal Analysis Conference, pp 599 ~ 605, 1986. 2 Los Angeles, America
- 17) Havemann, H. K.: Spannungs- und Schwingungsmessungen an der Brücke über die Norderelbe im Zuge der Bundesautobahn Südliche Umgehung Hamburg, Stahlbau 33. pp 289 ~ 297, 1964. 10

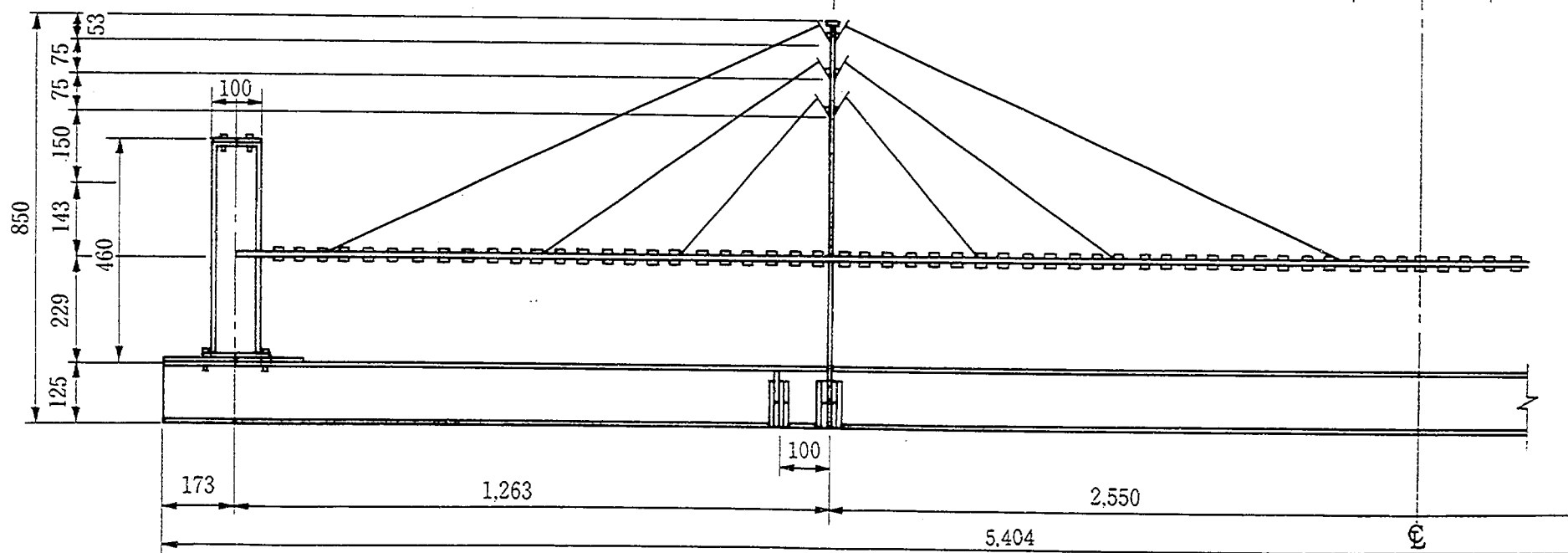
付 属 資 料

実 験 模 型 設 計 図

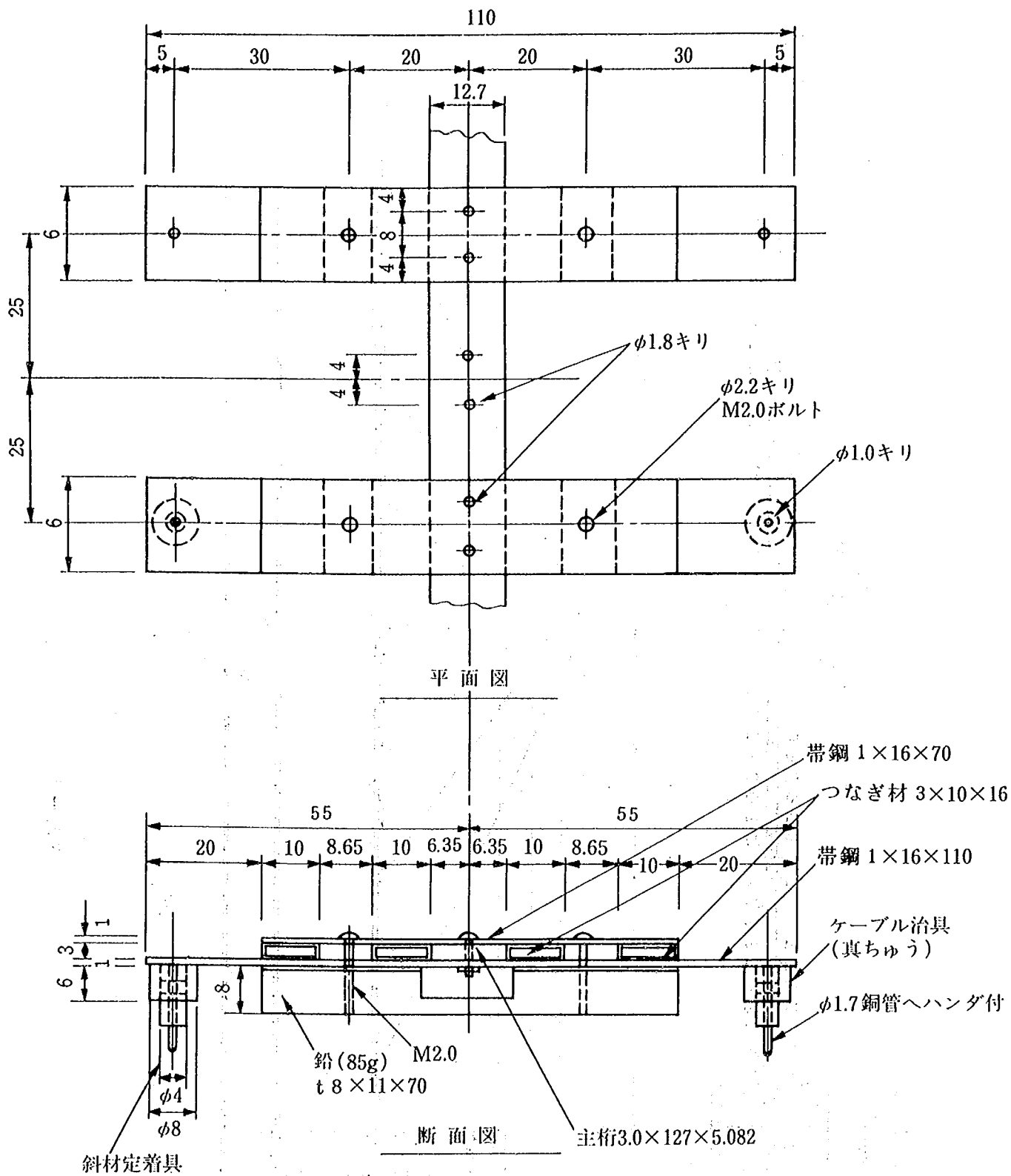
平面图



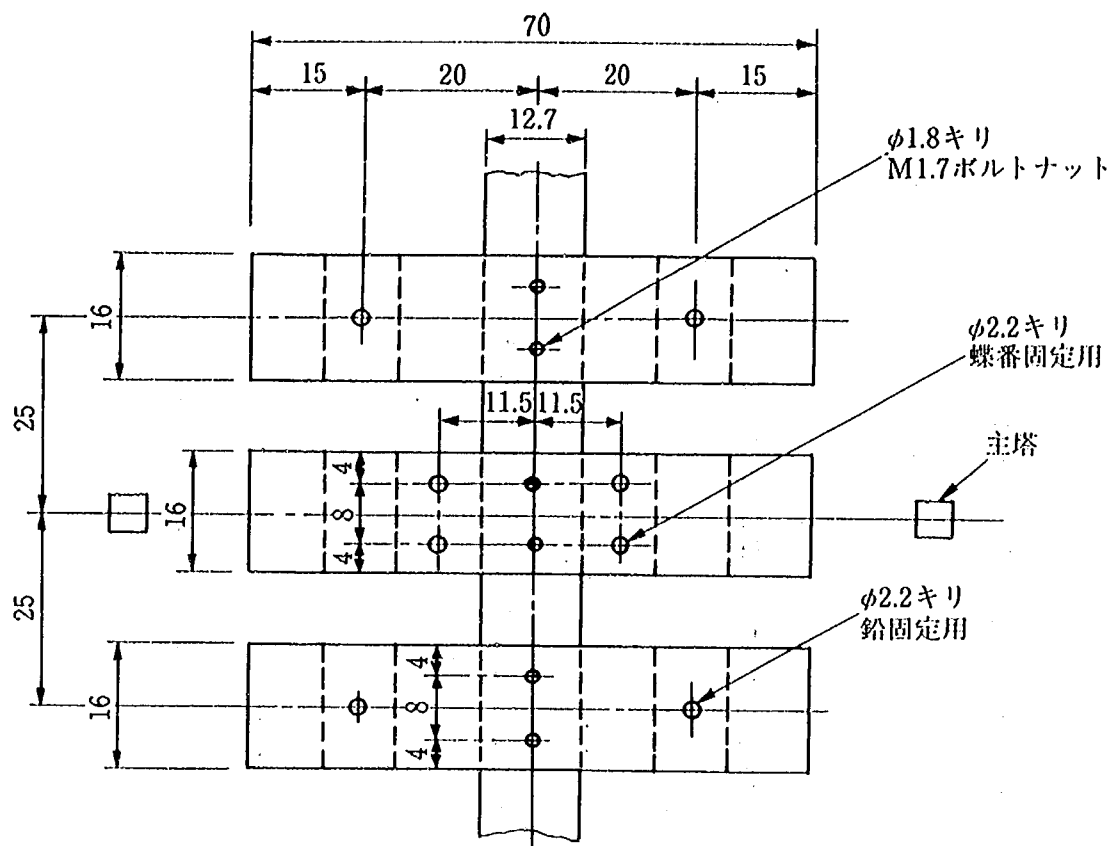
侧面图



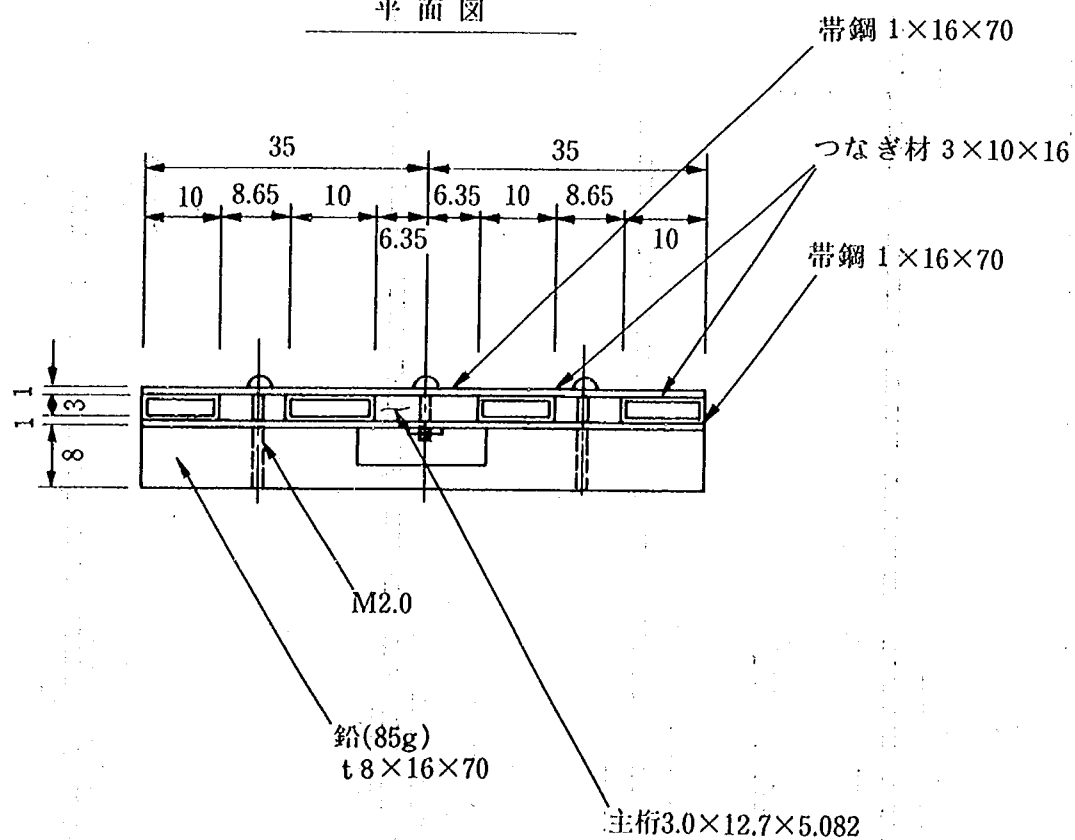
付图-1 模型全体一般图



付図-2 標準部主桁構造図



平面図



断面図

付図-3 主塔連結部主桁構造図

斜張橋の耐震性に関する研究

I S S N 0 3 8 6 - 5 8 7 8

土木研究所資料第2648号

一(その5)ケーブル形式が斜張橋の
減衰定数に及ぼす影響に関する自由
振動実験結果一

昭和63年7月(1988)

川島一彦, 運上茂樹

久保明英, 角本周

吾田洋一

キーワード: 斜張橋, 自由振動実験, 減衰特性

要 旨 近年, 長大スパンの斜張橋の採用事例が急増している。これは, 斜張橋が従来の吊橋と連続桁橋の中間の特性を有し, 吊橋のように巨大なアンカー基礎を必要とせず, 軟質な地盤上に建設される長大橋として構造的に適しているとともに構築技術の進歩に伴い, 長大スパン化が可能となったためである。しかしながら, 斜張橋に対しては, 従来震害経験がなく, また強震観測等による動的特性の把握も十分でないのが実情である。
本報告は, 模型自由振動実験により, ケーブル形式及びケーブル段数の違いによる斜張橋の減衰特性を検討した結果をとりまとめたものである。



郵便はがき

四十円切手
をはって下
さい

3 0 5 - □ □

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所
耐震研究室 御中

No. 003

No. 003

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2648号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名 印