

土木研究所資料

斜張橋ケーブルの制振対策に関する 調査報告書

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承認を得ずしてこれを行ってはならない。

斜張橋ケーブルの制振対策に関する 調査報告書

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

最近急増する斜張橋のケーブルのかなり大きな振幅の振動を構造力学的に制振する方法を明らかにするため、複素固有値解析および過渡応答解析のプログラムの作成および解析を行い効果を調査した。その結果ケーブルの連結の効果は、付加減衰だけではなく構造系の変化や、空気力の作用のしかたなどに関して総合的に評価する必要があること、ダンパーを使用する場合は数値解析や実験を行い、最も効果的な位置とダンパーの性能を選択する必要があることが示された。

キーワード：ケーブル振動，複素固有値解析，レインバイブレーション，ウェークギャロップング，制振方法

まえがき

昭和62年頃より斜張橋のケーブルがかなり大きな振幅の振動を起こす事例の報告と、その有効な制振対策の提出に対する要請が急増してきているが、斜張橋において、ケーブルはその構造系を成立させるための主要な部材であり、ケーブルの振動は心理面も含めての斜張橋の使用性を損なうばかりでなく、その安全性にも問題を投げかける。さらに、斜張橋はその優れた特性と景観上の一般的な人気から今後の建設も数多いものと予想され、斜張橋のケーブルの振動問題を早急に解決する必要性が高いと考えられ、昭和63年度土木研究所においてケーブルの制振方法に関し検討を行うこととなった。

制振方法としては、構造力学的な制振対策が数値解析による調査が比較的容易であり、また実橋でも採用されることが多いため、これに対し複素固有値解析および過渡応答解析を行い効果を調査した。今回は調査の手始めでもあり数多くの課題は残されたが、ここに今回の調査結果で明らかになったことおよび現段階で得られたケーブルの制振方法に関する考え方を取りまとめる。

目 次

1. 概 要	1
1.1 ケーブルの振動に関する研究の必要性	1
1.2 検討課題の設定	1
1.3 検討項目	2
2. 数値計算	4
2.1 数値計算の目的	4
2.1.1 ケーブルの連結効果の調査	4
2.1.2 その他の構造力学的制振装置	4
2.2 計算方法	4
2.2.1 計算方法の基礎	4
2.2.2 計算モデル	5
2.3 計算ケースおよび計算結果	9
2.3.1 ケーブルの連結効果に関する計算	9
2.3.2 オイルダンパーの設計法に関する計算および計算結果	11
2.4 考 察	22
2.4.1 ケーブル相互連結の基本的効果	22
2.4.2 全橋モデルにおけるケーブルの振動	24
2.4.3 オイルダンパーの効果	25
3. 他の研究の成果	31
3.1 事例調査	31
3.1.1 ケーブルの振動に関する事例調査	31
3.2 振動の特性及び対策	31
3.2.1 レインパイプレーション	31
3.2.2 ウェークギャロッピング	32
3.3 模型実験	33
4. 制振装置に関する考察と今後の課題	34
4.1 ケーブルの連結によって振動が抑えられる機構	34
4.2 ダンパーの効果	35
4.3 今後の課題	35

5. 予測と対策に関する考え方.....	36
5.1 安全性について.....	36
5.2 振動の予測.....	36
5.3 制振装置について.....	36
6. ま と め.....	38
参考文献.....	38
参考資料.....	39

1. 概 要

1.1 ケーブルの振動に関する研究の必要性

従来、長大橋梁において耐風性は橋桁に関して問題とされ、斜張橋のケーブルの耐風性に対する問題意識はやや低かった。またケーブルの耐風性が実橋で問題となる事例も少なかった。ところが、昭和62年頃より斜張橋のケーブルがかなり大きな振幅の振動を起こす事例の報告と、その有効な制振対策の提出に対する要請が急増してきた。

斜張橋において、ケーブルはその構造系を成立させるための主要な部材であり、ケーブルの振動は心理面も含めての斜張橋の使用性を損なうばかりでなく、その安全性にも問題を投げかける。さらに、斜張橋はその優れた特性と景観上の一般的な人気から今後の建設も数多いものと予想され、斜張橋のケーブルの振動問題を早急に解決する必要性が高いと考えられ、昭和63年度土木研究所においてケーブルの制振方法に関し検討を行うこととなった。

1.2 検討課題の設定

既存のケーブルの振動に関する検討としては、①六甲大橋（神戸市）、②櫃石島橋・岩黒島橋（本州四国連絡橋公団）、③名港西大橋（日本道路公団）、そして以下62年度に実施された④安治川橋梁、⑤横浜港横断橋（首都高速道路公団）、⑥東神戸大橋（阪神高速道路公団）に関する耐風性調査があった。上記の橋梁のうち、実橋でケーブルの振動が発現したものは①～⑤であり、⑥ケーブルの振動に対して事前検討を行ったものである。以上の研究では、ケーブル振動として、ケーブルの形状の特殊性に起因するギャロッピング、並列ケーブル特有のウェークギャロッピングそして降雨の影響で時には大振幅の振動を起こすレインバイブレーションの3種類が検討され、ある程度その特性が明かとされた。また、そこではいくつかの制振対策の提案と検証も実施されている。しかしながら、これらの研究は対象を特定の橋梁に絞っているため、制振効果の確認が対象橋梁にとどまることがあったり、まだ研究の途上にあるなど、ケーブルの振動について安全性の評価方法と、有効な制振対策を一般的に提出するには不十分である。したがって、個別的な橋梁に関して行われた成果を取りまとめつつ、一般的に効果のある斜張橋のケーブルの制振方法を論ずることができるよう新たな調査を進めることが課題となった。

上述のケーブルの振動で多くの斜張橋で発現する恐れのある現象は、ウェークギャロッピングおよびレインバイブレーションである。ウェークギャロッピングは、並列ケーブルにおいて上流側のケーブルの後流（ウェーク）が下流のケーブルに大きな振動を発生させるものである。またレインバイブレーションは、降雨時にケーブルを流れ落ちる水路（リブレット）が実質的にケーブルの形状を変え、発現すると考えられるものである。これらの現象を実橋でどのように扱うかを論じるためには、メカニズムの解明、対策工の検討、安全性の照査方法の体系化という課題がある。解決すべきケーブルの振動は現象的には、ウェークギャロッピングとレイン

パイブレーションという二つの対象があるため、研究課題は次のようになる。

- ①レインパイブレーションのメカニズム解明と空気力学的対策の検討
- ②ウェークギャロッピングのメカニズム解明と空気力学的対策の検討
- ③構造特性解析及び構造力学的対策の検討
- ④定着部の応力解析および安全性の照査方法
- ⑤現地観測による基礎資料の充実

これらの問題は全体的には長期的な研究によらねば明かにならないと考えられた。しかし先に述べた現状を考慮すると、制振方法に関してはやや暫定的な性格の強いものであっても早急な提案がなされる必要があり、本検討はこの制振対策の研究に重点を置くこととした。制振対策の研究のためには言うまでもなく振動の発生機構の研究や、達成目標として安全性の評価方法についての研究も重要である。しかし、これらの研究課題を短期間に一機関のみで実施することは施設の制約から不可能である。したがって本研究はケーブルの振動に関して問題を抱えている首都高速道路公団、日本道路公団、阪神高速道路公団、本州四国連絡橋公団と連絡や研究分担の調整を行って進めたものである。

1.3 検討項目

制振方法は空気力学的な制振方法と構造力学的な制振方法に大別される。このうち、振動の空気力学的方法は、検討すべき現象によって共通性のないものもある。さらに、ケーブルのような角を有しない形状の断面では常にレイノルズ数の相似が問題となり、さらに、風向やケーブルの傾斜角によって効果が異なってくるなど、考慮すべきパラメータが多くなり、検討は試行錯誤的でかつ帰納的に効果が判断される性質を帯やすい。こういった点に空力的な制振対策の検討の難しさがある。これに対し、構造力学的な制振対策は数値解析による調査が比較的容易であり、実験との比較を通じて実橋の構造解析から有効な制振工を設計することが可能となる見込みが大きい。事実、振動が発現した多くのケーブルでは表-1に示すように構造力学的な制振対策が取られることが多い。したがって制振対策の緊急性から本課題において土木研究所では構造力学的な制振方法を調査した。

具体的な方法としては、構造的な相似則を重視した三次元模型による振動実験や斜張橋のケーブルの特性を考慮した複素固有値解析および過渡応答振動解析を行って制振対策工の制振機構や有効性を明らかにするものであるが、ここでは解析プログラムの作成と計算を行い、模型実験は別にとりまとめた。

表-1 制振対策

橋 梁	発 現 し た 現 象	制 振 方 法
六 甲 大 橋	ギ ャ ロ ッ ピ ン グ	ケーブルの相互連結
櫃 石 島 橋	ウェークギャロッピング	ケーブルの相互連結
名 港 西 大 橋	レインパイブレーション	ケーブルの相互連結
安 治 川 橋 梁	レインパイブレーション	検討中
荒 津 大 橋	レインパイブレーション	オイルダンパー
呼 子 大 橋	ウェークギャロッピング	ケーブルの相互連結
布施田浦橋梁	ウェークギャロッピング	検討中

2. 数 値 計 算

2.1 数値計算の目的

2.1.1 ケーブルの連結効果の調査

解析はまずケーブルの連結によって振動が抑えられるメカニズムの調査と効果的なケーブル連結法の予測を目的として行われた。

ケーブルの連結によって振動が抑えられる原因としては次の三項目が考えられる。

- ①他のケーブルの減衰が振動しているケーブルに対して減衰を付加する。
- ②相互のケーブル毎の独立モードの振動数が異なるため、干渉に類する効果が生じる。
- ③他のケーブルが振動しているケーブルに対して付加重量となる。

以上の効果を調べるためにはそれぞれの効果を分離する必要がある。この分離の方法の基本的な考え方は以下に挙げるように、それぞれの効果の有無を調べることによった。

- ①減衰の効果を無くするために、着目ケーブル以外の減衰項は0とした。
- ②振動数の影響を無くするために各ケーブルの長さおよび張力を同じにし、同じ振動数を得た。
- ③重量の効果を変化させるために、着目ケーブル以外の重量を1/2とした。

さらに、着目するケーブルが他のケーブルからどのような作用を受けるか、また高次の振動が連成した時にケーブルはどのような挙動を示すか等を調査して、ケーブルの連結によってもたらされる制振のメカニズムを明らかにすることを目標とした。

2.1.2 その他の構造力学的制振装置

その他の制振装置としては、オイルダンパーやストックブリッジダンパ等があり、その原理はケーブルの連結と比べかなり単純である。また、これらの対策に関してはケーブルの連結のような他のケーブルとの相互作用を考慮する必要性は極めて低い。したがってここでの検討は一本のケーブルの高次モードを含めた振動に対する有効性を調査することとした。なお、今回はオイルダンパーだけを解析の対象とした。

2.2 計算方法

2.2.1 計算方法の基礎

計算は平面骨組みモデルによって複素固有値解析を行い、さらに必要に応じ起振機実験を想定する意味で過渡応答解析を行った。

加振力としてはケーブルの高次の振動も考慮したものを与え、これに対する過渡応答および自由減衰性状を求める。ここで、過渡応答は着目するケーブルの振動の発達時間や波形、定常状態における振幅から制振対策の効果を検討することを目的として、自由減衰性状は直接ケーブルの減衰を調べるために計算する。参考資料に解析理論およびプログラムのフローを示す。

2.2.2 計算モデル

(1) ケーブル連結効果の調査

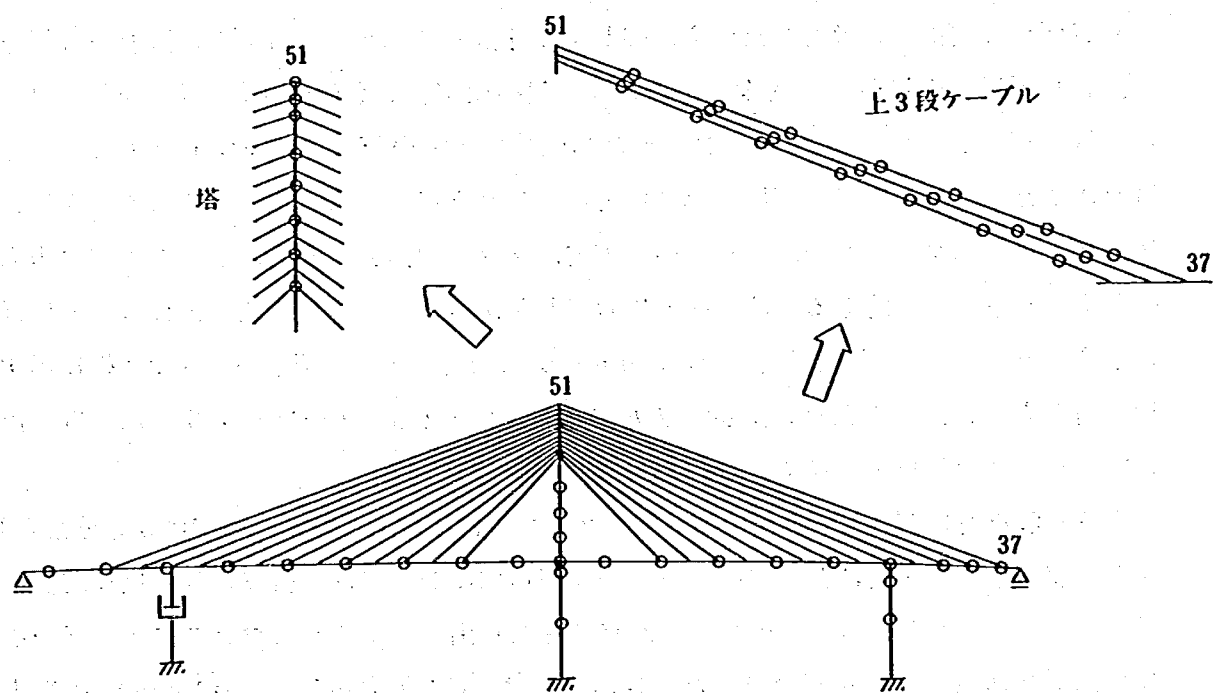
計算は荒津大橋を参考とした橋梁に関し平面骨組みモデルによって複素固有値解析を行い、さらに過渡応答振動を見ることにより、起振機実験を数値的に行った。図-1.1~3に計算モデルを示す。図-1.1は質量及び粘性減衰係数の導入方法を示したものである。計算にあたっては、電子計算機の処理能力の関係から必ずしも全ての節点に質点を導入せず、さらにケーブルの回転、タワーの軸方向、タワーの鉛直方向、および桁の水平方向に関与する質量を部分的あるいは全面的に考慮しなかった。また粘性減衰係数は図-1.1(b)に示すように、ケーブル軸に直交する方向に関して導入している。図-1.2は後に示す全橋を対象とした計算のための解析モデルであり、図-1.3はケーブルを3本だけ取り出した計算ケースの解析モデルである。

全橋を解析対象としたモデルにおいて、ケーブルは片側上3段については8等分割とし、さらに連結点を別途設けた。他のケーブルは連結側に関しては連結点のみ、反連結側には設けなかった。また計算3本のケーブルだけを取り出したモデルにおいてはケーブルを24等分割し連結点に節点を別途設けた。連結部材は1tfの張力が入った $\phi 14\text{mm}$ に相当する鋼線とした。

ケーブル減衰は、1次モードが対数減衰率 $\delta=0.01$ となるように全ての節点に減衰を導入し、一本のケーブルに関して各節点に導入する減衰は同じ値とした。表-2および図-2に4次までのケーブルの減衰率を示す。表-2の構造減衰率の値に関しては、実際のケーブルの減衰を全く反映していない。すなわち、実際のケーブルでは1次の対数減衰率が最も高く、高次の減衰率はその1/2程度となるのに対し、図-2では振動数に比例して対数減衰率は大きくなっている。これは減衰の作用する方向をケーブルに直交する方向としたため、伸縮の応力変動による所が多い¹⁾現実のケーブルの構造減衰のメカニズムと異なったためと考えられる。このため今後の検討において構造減衰に関して絶対的な評価はできない。

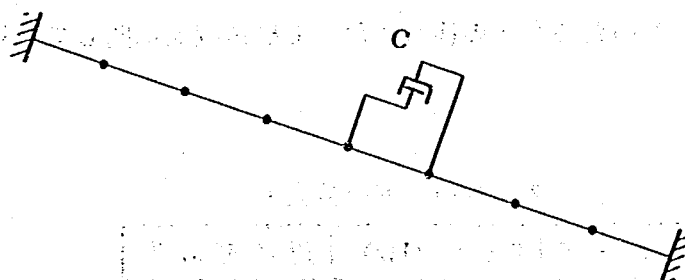
表-2 各モードの減衰率

振動モード	振動数 (Hz)	対数減衰率
1 次	0.6319	0.0100
2 次	1.240	0.0196
3 次	1.800	0.0285
4 次	2.290	0.0363



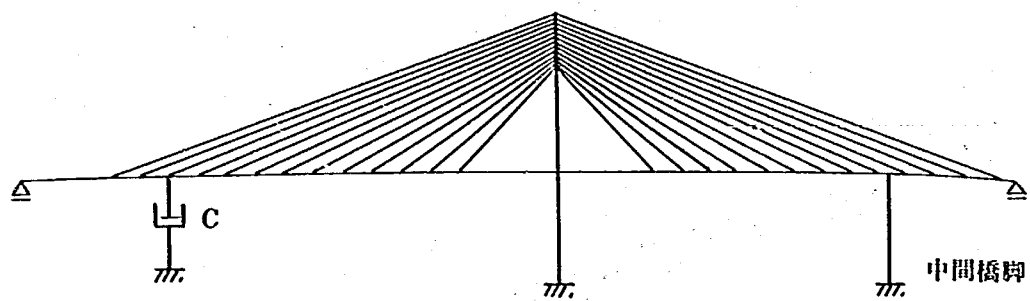
桁	: Y方向マス	19
塔, 脚	: X方向マス	15
ケーブル	: X, Y方向マス	42
合計		76

(a) 質量点の導入方法

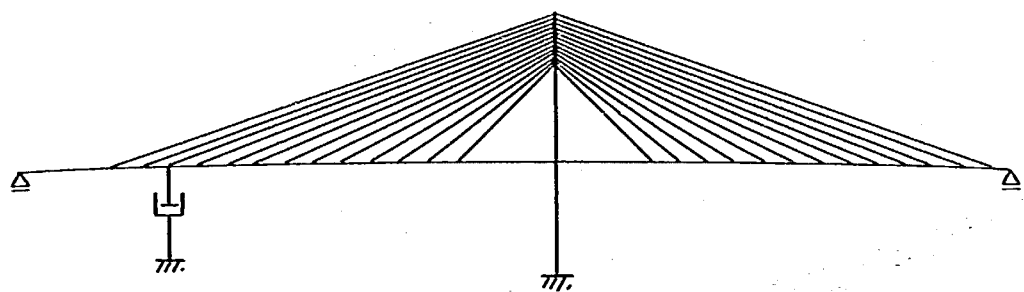


(b) 減衰係数の導入方法

図-1.1 解析モデル図 (その1)

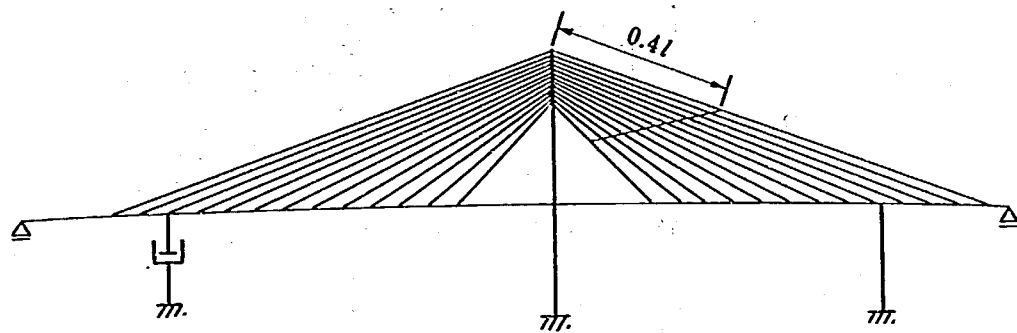


CASE 1

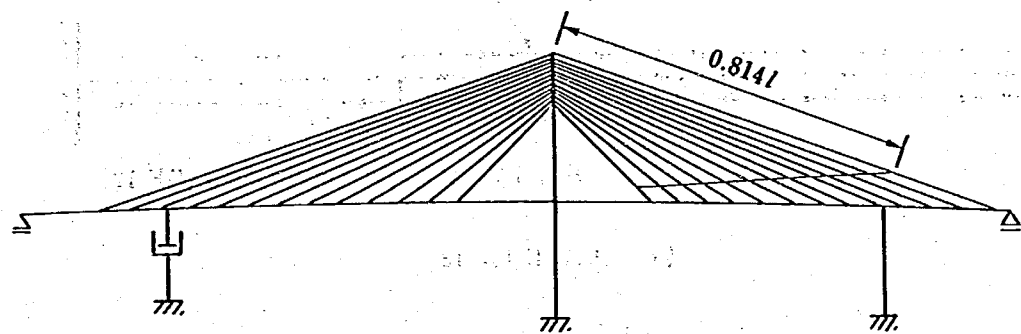


CASE 2

(中間橋脚なし)

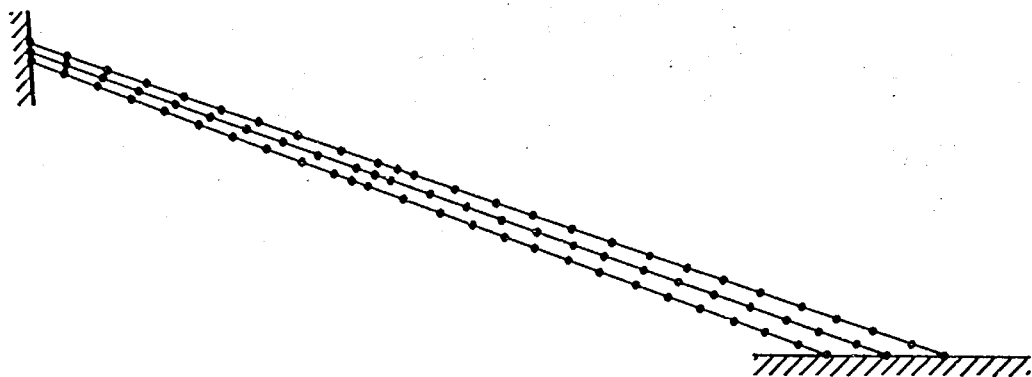


CASE 3, 4 (連結位置 a)

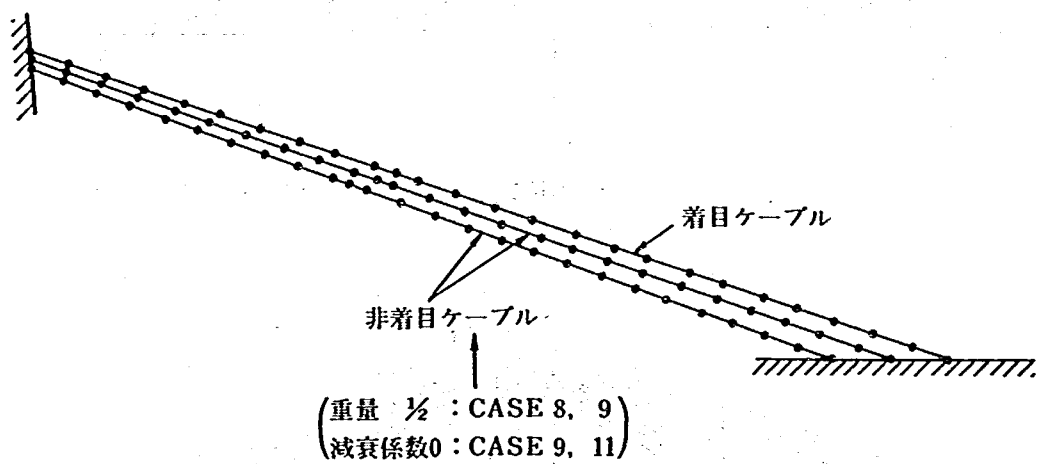


CASE 5 (連結位置 b)

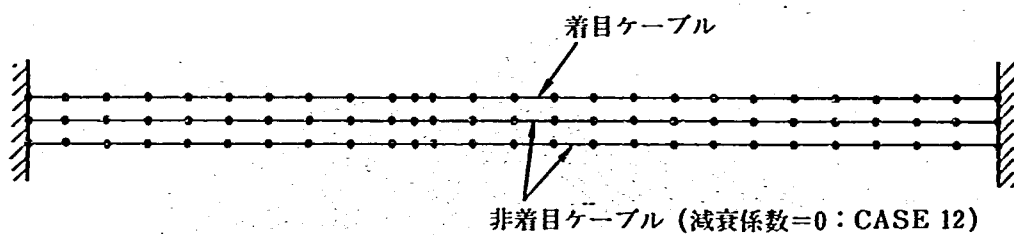
図-1.2 解析モデル図 (その2)



(a) CASE 6, 7



(b) CASE 8, 9, 11



(c) CASE 10, 12

図-1.3 解析モデル図 (その3)

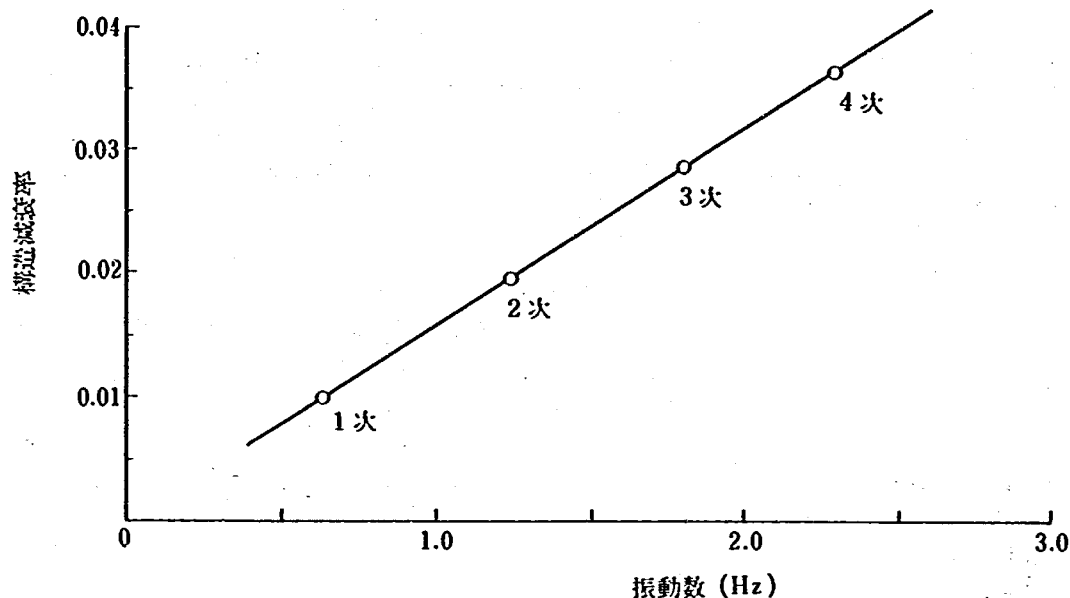


図-2 モード毎の構造減衰率

加振力としてはケーブル連結後の様々な次数の振動を重ね合わせたものを与え、これに対する過渡応答を求めた。ここで、過渡応答は着目するケーブルの振動の波形から制振効果を考察するために計算した。

(2) ダンパーの設計方法に関する調査

ダンパーの設計法を調べるために、図-3に示す単一のケーブルおよびダンパーに関して複素固有値解析を行った。節点および質量はダンパーを設置する側で密に取った。

2.3 計算ケースおよび計算結果

2.3.1 ケーブルの連結効果に関する計算

表-3に計算ケースを示し、以下にそれぞれの計算ケースの目的を述べる。

①計算ケースNo. 1～5：斜張橋全体系すなわち、桁およびタワーの剛性や質量を考慮したケーブルの振動の挙動を調査するために行ったものである。No. 1は比較のための基本としての無対策の系、No. 2はケーブル振動における中間橋脚の有無の影響、No. 3～5は連結の効果を位置の影響も併せて調査するためのケースである。

②計算ケースNo. 6～12：構造系を単純にし、理想的な条件のもとで計算を行い、ケーブルの連結によって振動が抑えられるメカニズムを調査するためのケースであり、No. 1～5よりも先に行った。計算ケースNo. 6, 7は全橋から上3段のケーブルを取り出したもので、後続のケースの比較の基本となるケースである。No. 8～12は着目ケーブルに非着目ケーブルが与える影響として、それぞれ順に振動数、重量、そして減衰の影響を適宜調整したものである。

計算結果として、全計算ケースの振動モード図を図-4.1～10に示す。なお今回の検討で

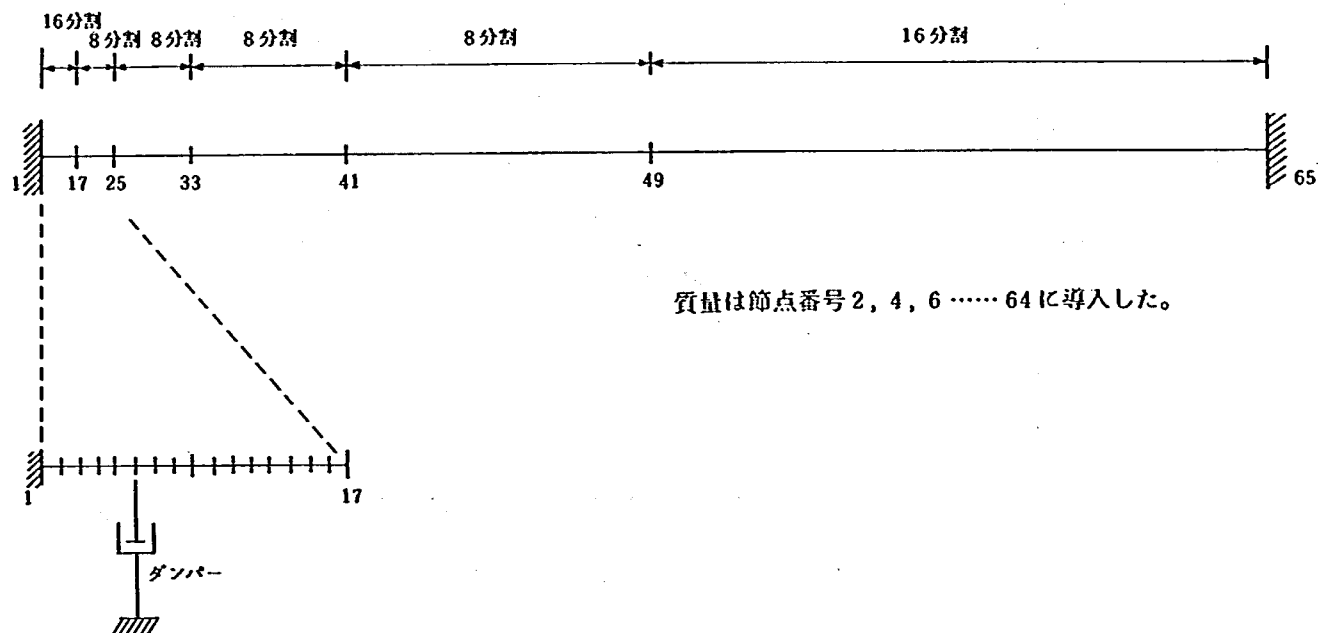


図-3 ダンパー設計法調査のモデル

表-3 計算 ケー ス

計算No.	計算対象モデル (図- 3 参照)			加振力 個数	モード 計算	変位着目 点数
	構 造 系		ケーブル連結位置			
1	全 橋	基 本 斜 張 橋	連結なし	1	有	3
2		中間橋脚なし	//	1	有	3
3		ケーブル連結	a	1	有	3
4		//	a	2	無	4
5		//	b	3	有	4
6	3 本 ケ ー ブ ル	基 本 系	a	1	有	4
7		//		2	無	
8		条 件 a		1	有	
9		条件 a + 条件 b		1	有	
10		条件 b + 条件 c		1	有	
11		条 件 b		1	有	
12		条 件 c		1	有	

条件 a : 着目ケーブル以外のケーブル重量を1/2とする。

条件 b : 着目ケーブル以外の減衰項を 0 とする。

条件 c : 全てのケーブルの張力および長さを一致させる。

は過渡応答解析が必ずしも興味深い結果を提出しているとは限らないため、必要に応じて示すにとどめた。以下に図-4に示された振動の特徴をまとめる。

- (1) 図-4.1, 2 : ケーブルは一本だけが独立に振動している。モード5では桁の2次振動によって3段目のケーブルが振動している。その振幅は中間橋脚のある場合の方が大きい。
- (2) 図-4.3, 4 : 一本のケーブルだけが振動するモードは存在しなくなる。振動の形態としては連結点をほぼ完全な節とする振動(図-4.3のモード5や図-4.4のモード3から5等)と連結部材が伸縮しながら連結点が不完全に節となっている振動に分けられる。
- (3) 図-4.5, 8~10 : 連結点がほとんど剛体的な変位をし、全てのケーブルが正弦波的な挙動を示すものと連結点が振動の節となるものに分かれる。
- (4) 図-4.6, 7 : 最上段ケーブル以外が最上段ケーブルの振動を抑える弾性支承のような挙動を示すモードが出て来る(モード1~4)。

2.3.2 オイルダンパーの設計法に関する計算ケースおよび計算結果

計算はダンパーの位置および強度を変化させた。また計算の成果をケーブル一般に適用できるものとするために、ケーブルの張力や重量の影響を調べた。

計算結果として表-4に構造減衰をまとめる。

表-4.1 ダンパーの効果($l_0/l=0.0097$)

振動次数 $c(\text{kg} \cdot \text{s}/\text{cm})$	1	2	3	4
75	1.015	1.828	2.387	2.777
150	1.826	2.764	2.973	2.902
300	2.829	2.893	2.386	1.997
600	2.954	1.979	1.401	1.101
1500	1.688	0.881	0.589	0.453

表-4.2 ダンパーの効果($l_0/l=0.0175$)

振動次数 $c(\text{kg} \cdot \text{s}/\text{cm})$	1	2	3	4
75	3.023	4.780	5.366	5.418
100	3.801	5.318	5.326	4.964
150	4.896	5.384	4.590	3.912
300	5.495	3.867	2.767	2.188
600	3.942	2.163	1.457	1.127

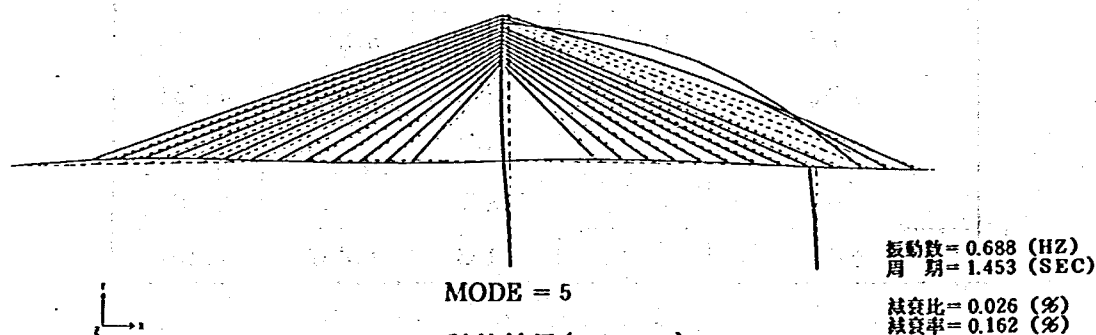
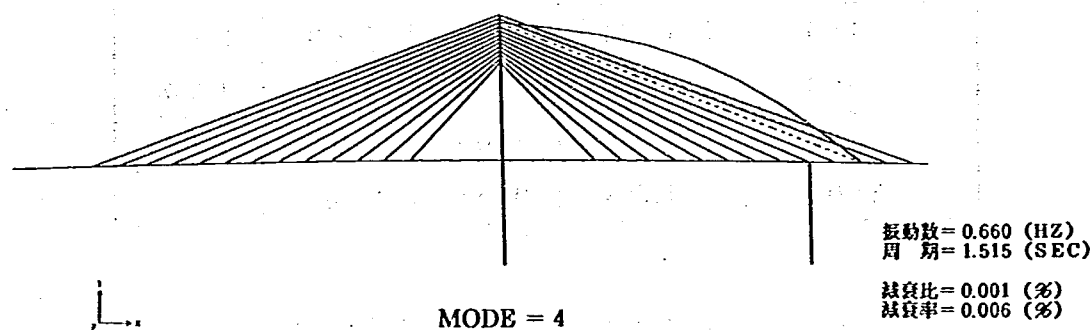
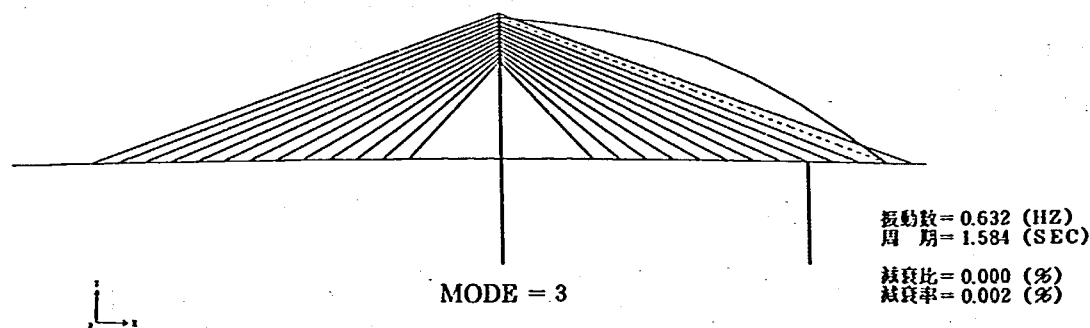
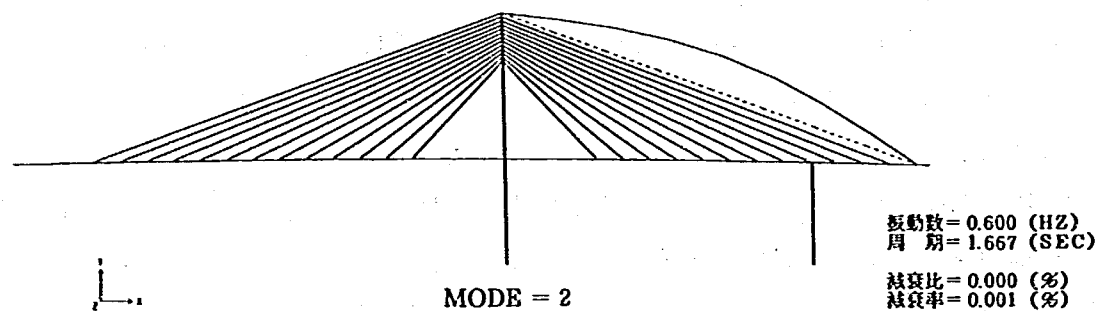
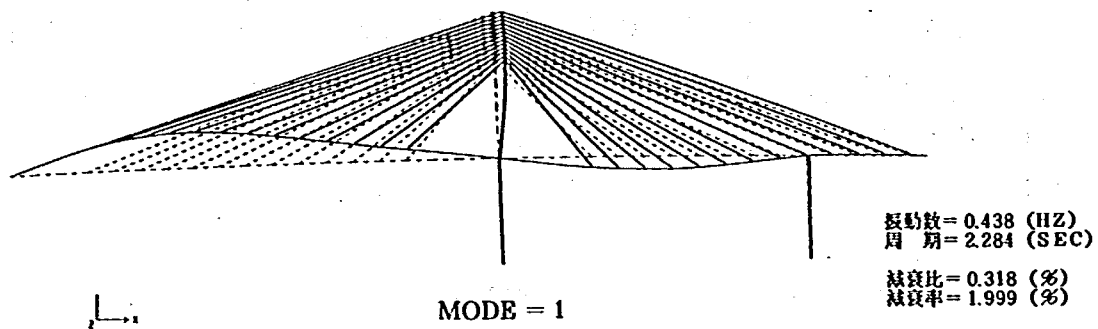


図-4.1 計算結果(CASE 1)

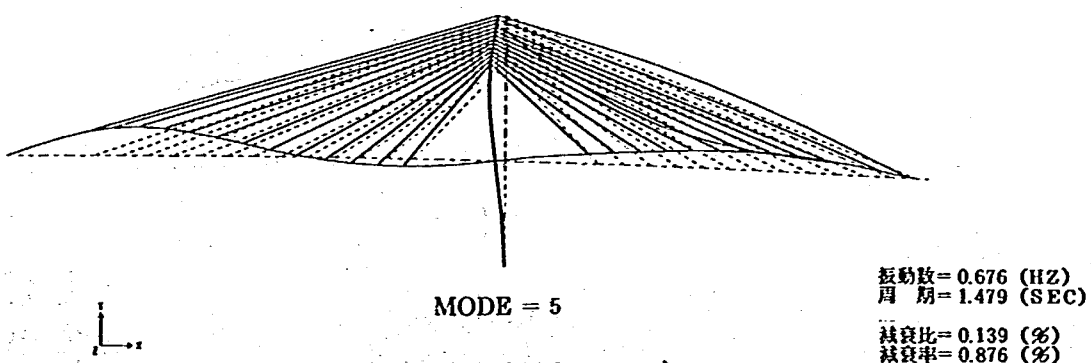
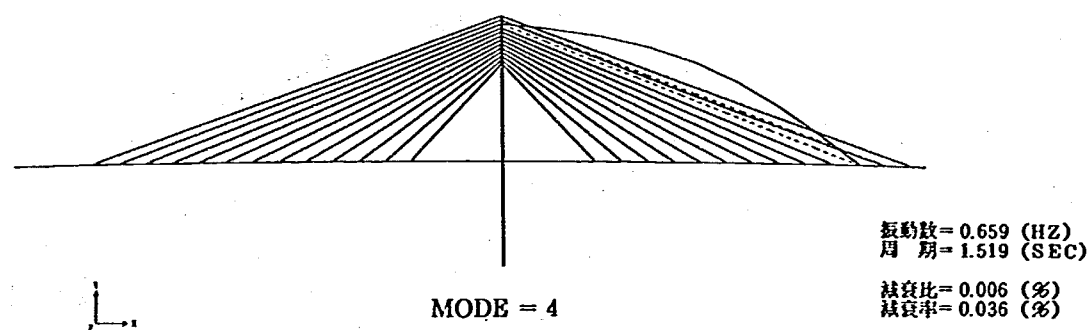
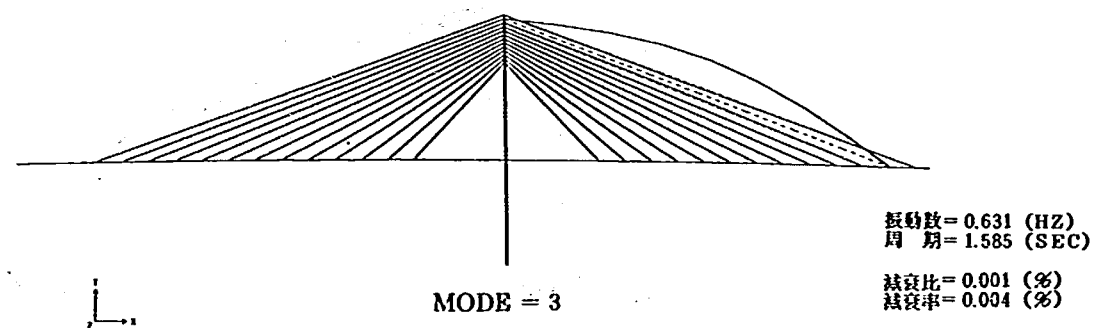
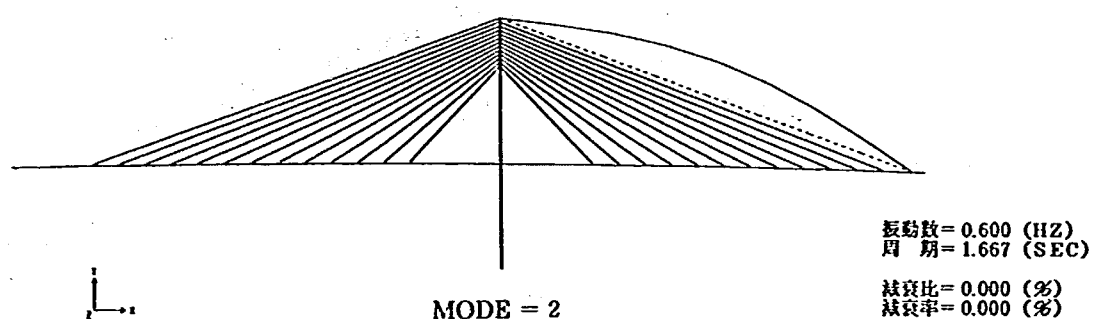
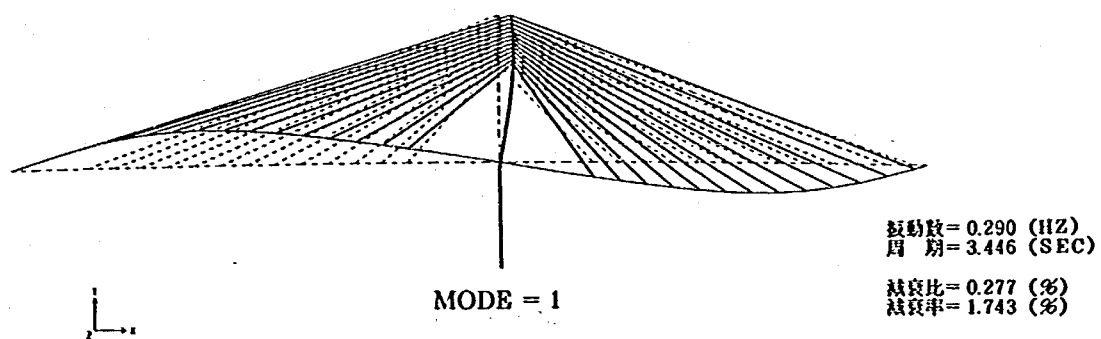


図-4.2 計算結果(CASE 2)

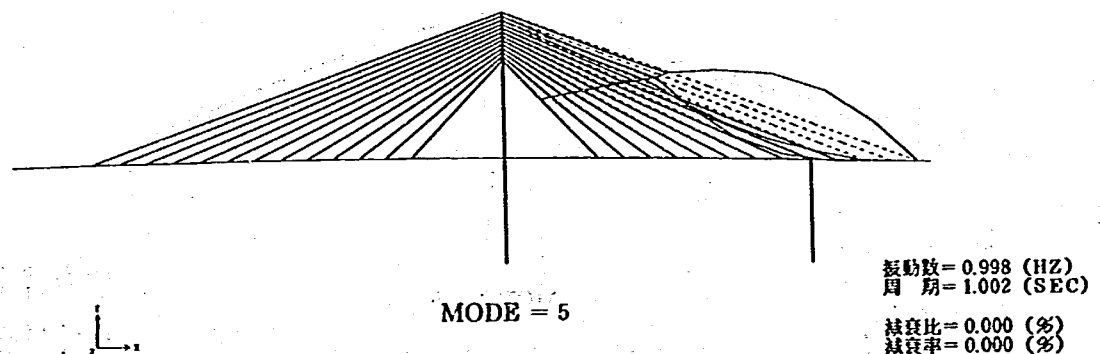
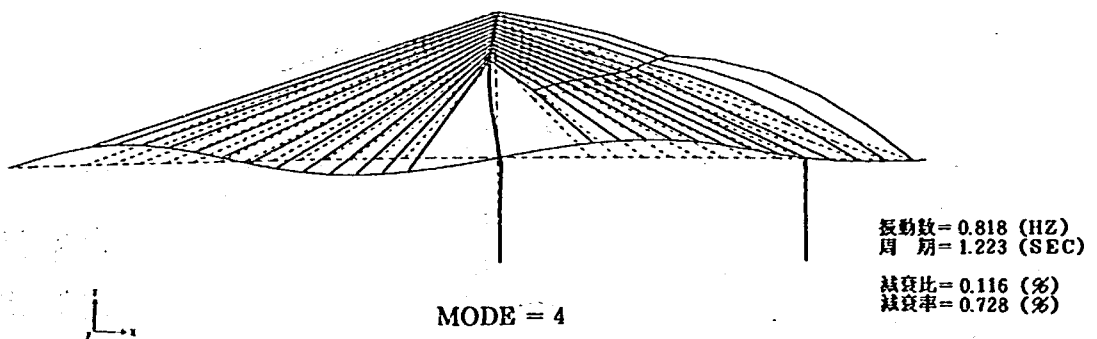
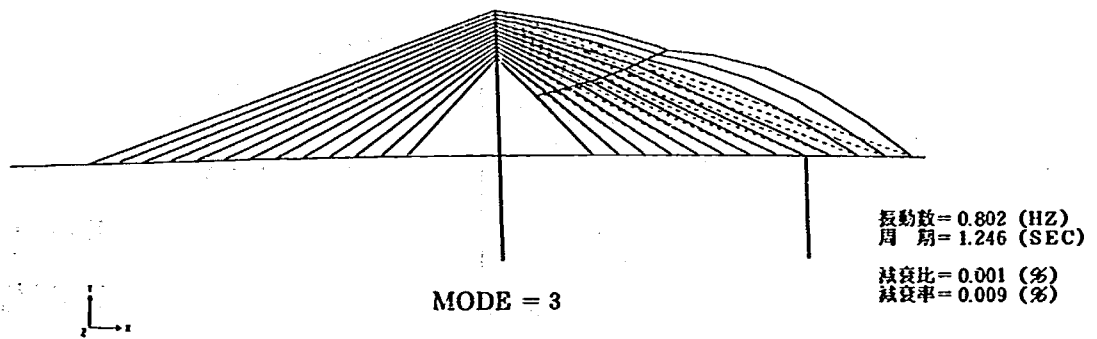
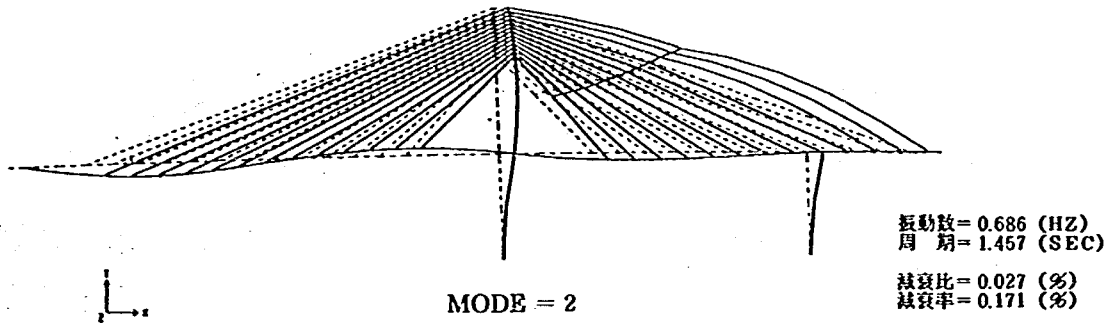
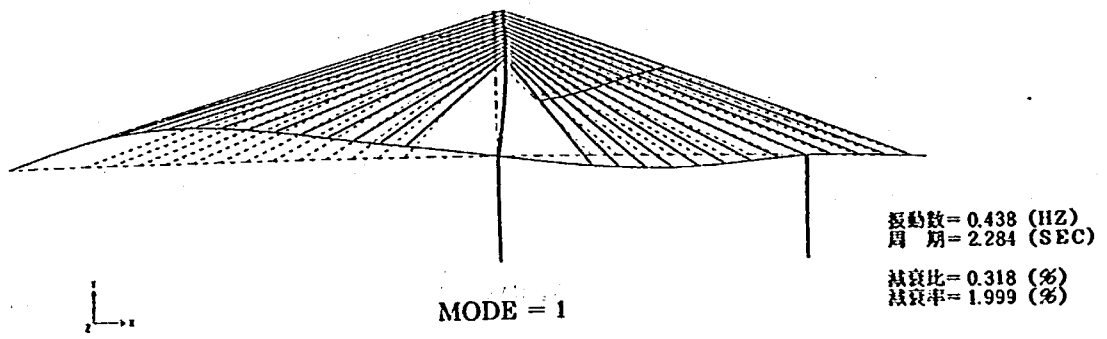


図-4.3 計算結果(CASE 3,4)

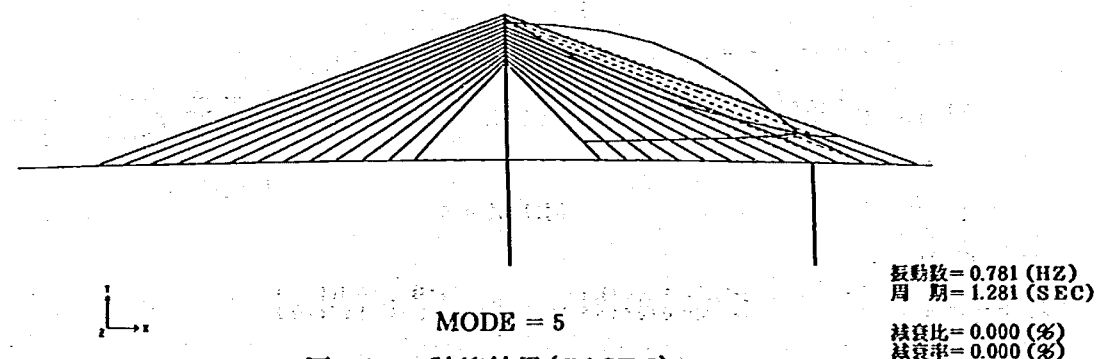
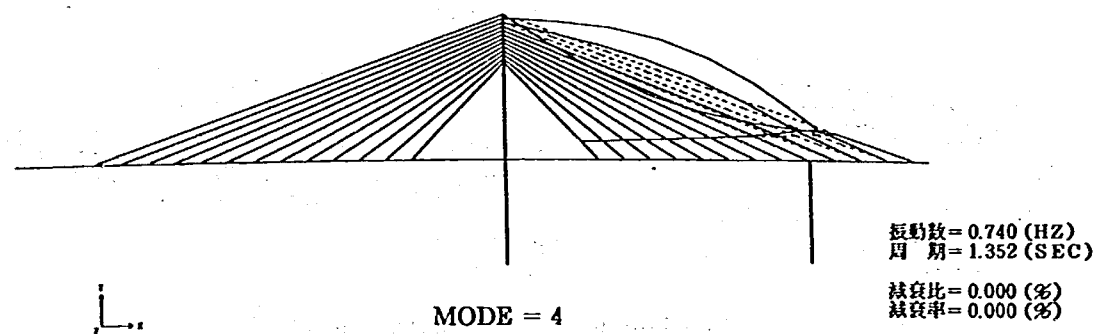
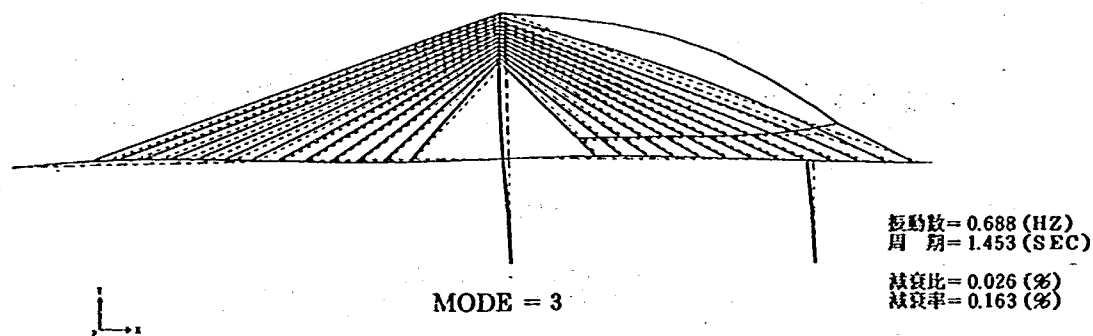
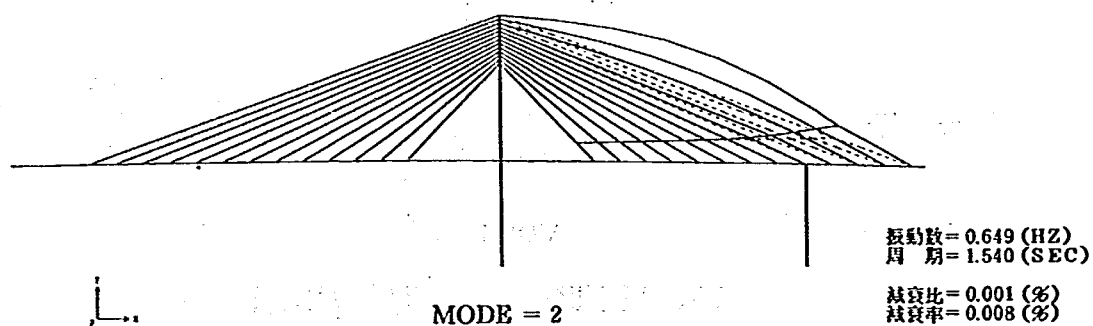
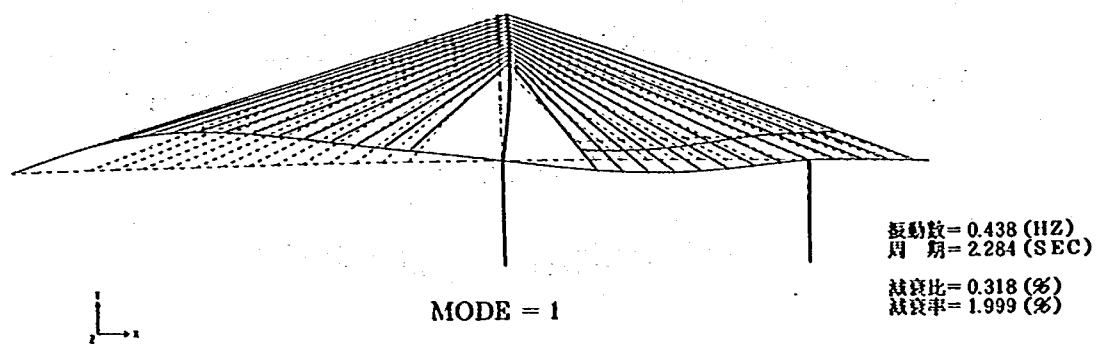
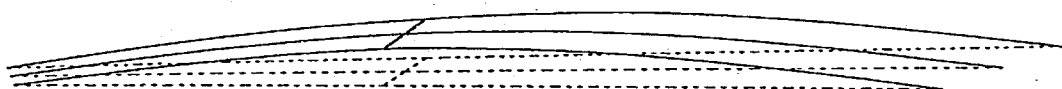
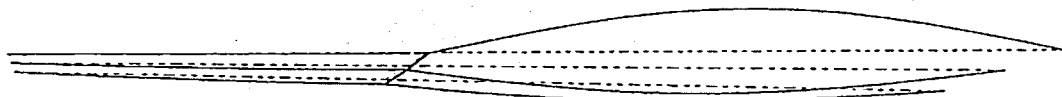


図-4.4 計算結果(CASE 5)



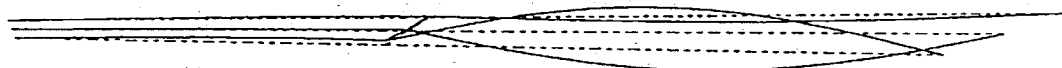
MODE = 1

振動数 = 0.632 (HZ) 減衰比 = 0.159 (%)
周 期 = 1.582 (SEC) 減衰率 = 0.998 (%)



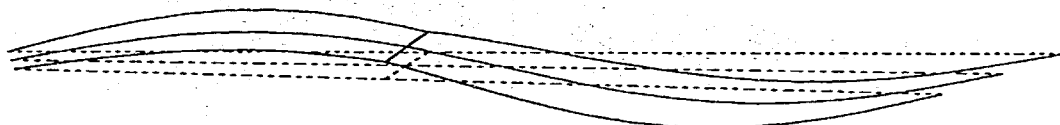
MODE = 2

振動数 = 1.008 (HZ) 減衰比 = 0.230 (%)
周 期 = 0.992 (SEC) 減衰率 = 1.445 (%)



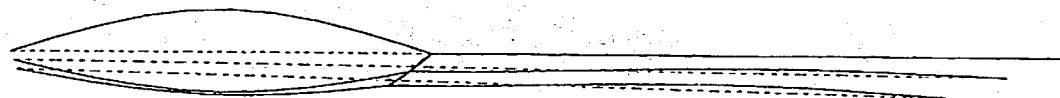
MODE = 3

振動数 = 1.069 (HZ) 減衰比 = 0.236 (%)
周 期 = 0.936 (SEC) 減衰率 = 1.483 (%)



MODE = 4

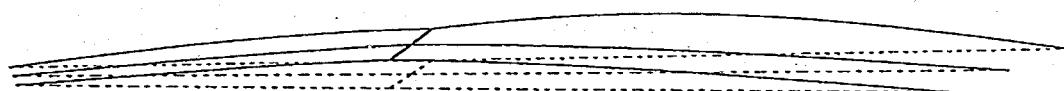
振動数 = 1.263 (HZ) 減衰比 = 0.303 (%)
周 期 = 0.792 (SEC) 減衰率 = 1.904 (%)



MODE = 5

振動数 = 1.509 (HZ) 減衰比 = 0.314 (%)
周 期 = 0.663 (SEC) 減衰率 = 1.974 (%)

図-4.5 計算結果(CASE 6,7)

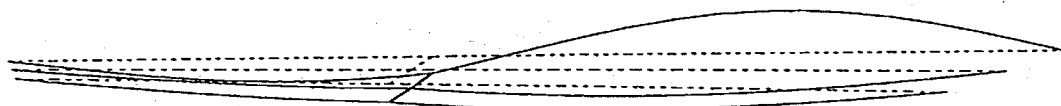


MODE = 1



振動数 = 0.736 (HZ)
周 期 = 1.359 (SEC)

減衰比 = 0.182 (%)
減衰率 = 1.141 (%)

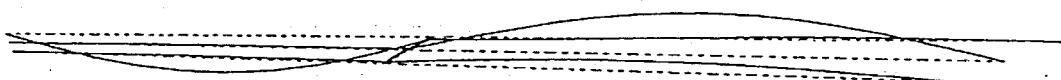


MODE = 2



振動数 = 1.131 (HZ)
周 期 = 0.884 (SEC)

減衰比 = 0.277 (%)
減衰率 = 1.739 (%)

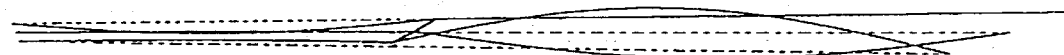


MODE = 3



振動数 = 1.478 (HZ)
周 期 = 0.677 (SEC)

減衰比 = 0.320 (%)
減衰率 = 2.012 (%)

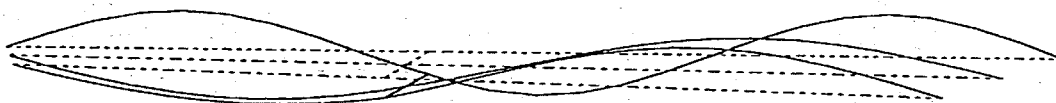


MODE = 4



振動数 = 1.515 (HZ)
周 期 = 0.660 (SEC)

減衰比 = 0.329 (%)
減衰率 = 2.064 (%)



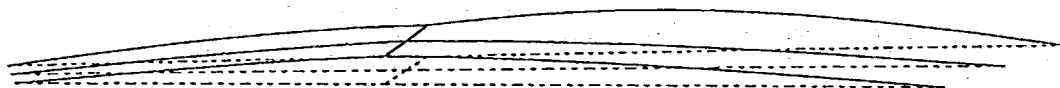
MODE = 5



振動数 = 1.815 (HZ)
周 期 = 0.551 (SEC)

減衰比 = 0.430 (%)
減衰率 = 2.702 (%)

図-4.6 計算結果(CASE 8)

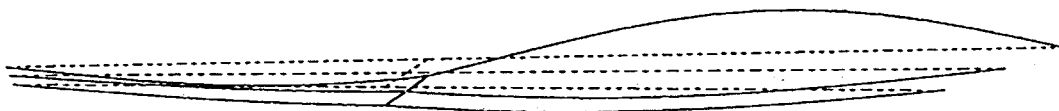


MODE = 1



振動数 = 0.736 (HZ)
周 期 = 1.359 (SEC)

減衰比 = 0.099 (%)
減衰率 = 0.621 (%)

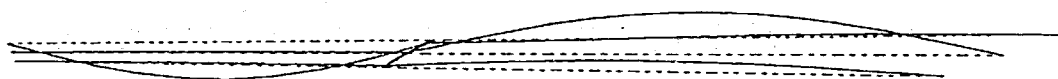


MODE = 2



振動数 = 1.131 (HZ)
周 期 = 0.884 (SEC)

減衰比 = 0.216 (%)
減衰率 = 1.360 (%)

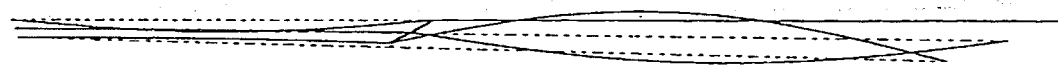


MODE = 3



振動数 = 1.478 (HZ)
周 期 = 0.677 (SEC)

減衰比 = 0.160 (%)
減衰率 = 1.004 (%)

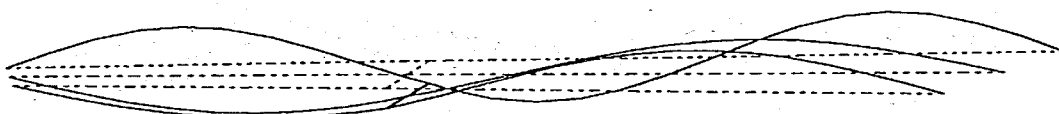


MODE = 4



振動数 = 1.515 (HZ)
周 期 = 0.660 (SEC)

減衰比 = 0.026 (%)
減衰率 = 0.162 (%)



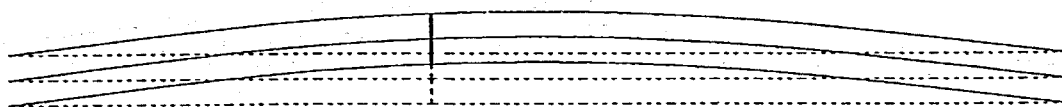
MODE = 5



振動数 = 1.815 (HZ)
周 期 = 0.551 (SEC)

減衰比 = 0.245 (%)
減衰率 = 1.542 (%)

図-4.7 計算結果 (CASE 9)

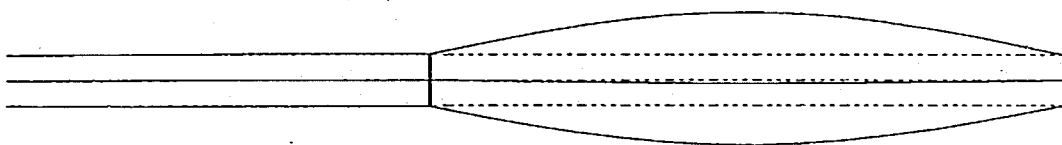


MODE = 1



振動数 = 0.604 (HZ)
周 期 = 1.657 (SEC)

減衰比 = 0.052 (%)
減衰率 = 0.328 (%)

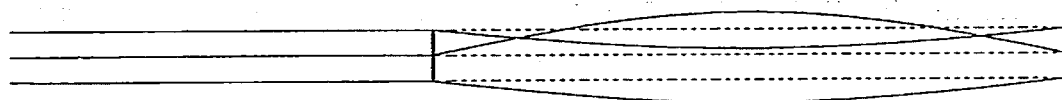


MODE = 2



振動数 = 0.997 (HZ)
周 期 = 1.003 (SEC)

減衰比 = 0.121 (%)
減衰率 = 0.760 (%)

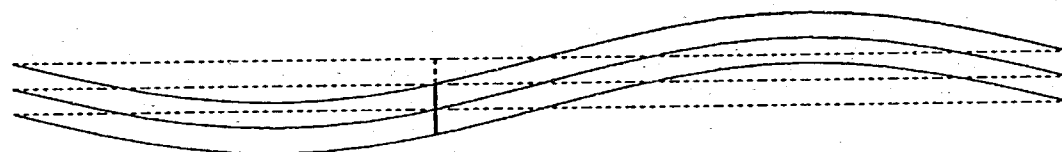


MODE = 3



振動数 = 1.000 (HZ)
周 期 = 1.000 (SEC)

減衰比 = 0.037 (%)
減衰率 = 0.231 (%)

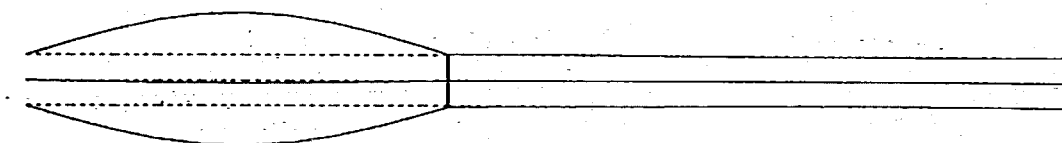


MODE = 4



振動数 = 1.205 (HZ)
周 期 = 0.830 (SEC)

減衰比 = 0.101 (%)
減衰率 = 0.633 (%)



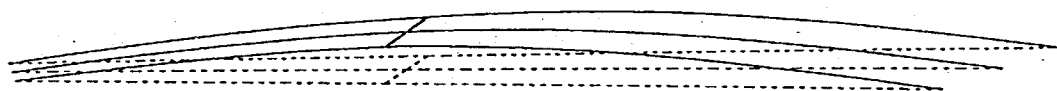
MODE = 5



振動数 = 1.497 (HZ)
周 期 = 0.668 (SEC)

減衰比 = 0.165 (%)
減衰率 = 1.037 (%)

図-4.8 計算結果(CASE 10)



MODE = 1



振動数 = 0.632 (HZ)
周 期 = 1.582 (SEC)

減衰比 = 0.060 (%)
減衰率 = 0.375 (%)

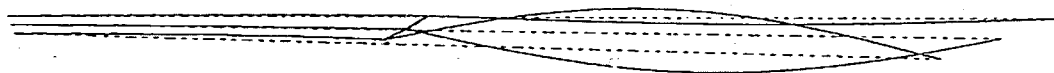


MODE = 2



振動数 = 1.008 (HZ)
周 期 = 0.992 (SEC)

減衰比 = 0.162 (%)
減衰率 = 1.015 (%)

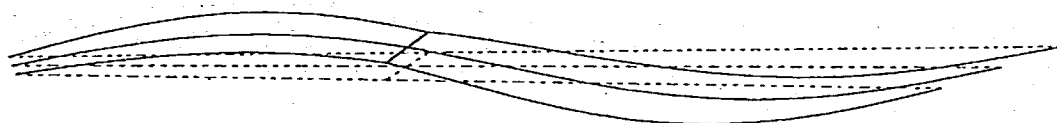


MODE = 3



振動数 = 1.069 (HZ)
周 期 = 0.936 (SEC)

減衰比 = 0.004 (%)
減衰率 = 0.024 (%)

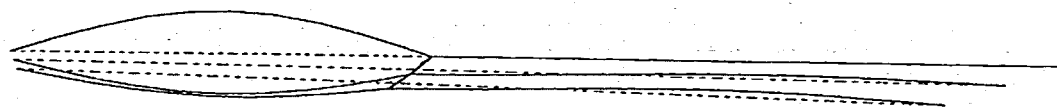


MODE = 4



振動数 = 1.263 (HZ)
周 期 = 0.792 (SEC)

減衰比 = 0.110 (%)
減衰率 = 0.693 (%)



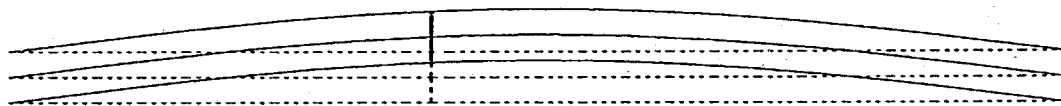
MODE = 5



振動数 = 1.509 (HZ)
周 期 = 0.663 (SEC)

減衰比 = 0.193 (%)
減衰率 = 1.211 (%)

図-4.9 計算結果(CASE 11)

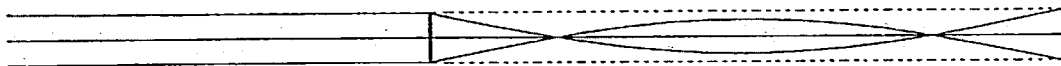


MODE = 1



振動数 = 0.604 (HZ)
周 期 = 1.657 (SEC)

減衰比 = 0.157 (%)
減衰率 = 0.985 (%)

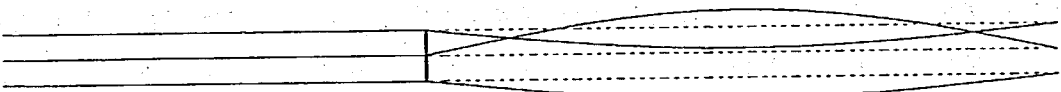


MODE = 2



振動数 = 0.997 (HZ)
周 期 = 1.003 (SEC)

減衰比 = 0.236 (%)
減衰率 = 1.482 (%)

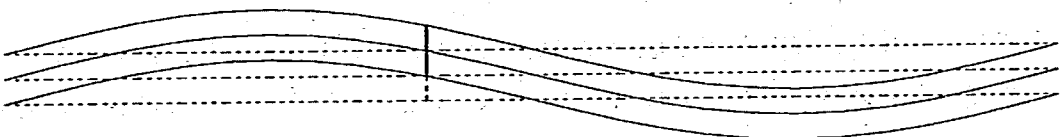


MODE = 3



振動数 = 1.001 (HZ)
周 期 = 0.999 (SEC)

減衰比 = 0.239 (%)
減衰率 = 1.499 (%)

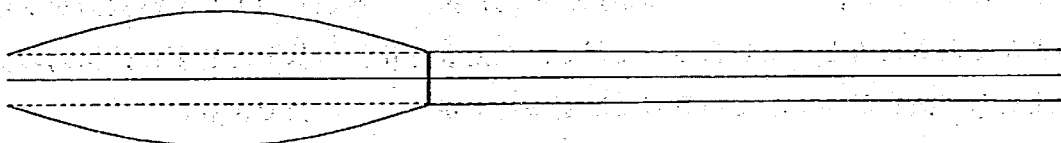


MODE = 4



振動数 = 1.205 (HZ)
周 期 = 0.830 (SEC)

減衰比 = 0.302 (%)
減衰率 = 1.900 (%)



MODE = 5



振動数 = 1.497 (HZ)
周 期 = 0.668 (SEC)

減衰比 = 0.323 (%)
減衰率 = 2.031 (%)

図-4.10 計算結果(CASE 12)

2.4 考 察

2.4.1 ケーブル相互連結の基本的効果

モード計算の計算結果および過渡応答解析の結果より、ケーブルの連結による制振効果について考察する。

(1) 振動数の相違の影響

図-4.5と4.10を比較して連結後の固有振動に対する連結前のケーブルの振動数の相違の影響を見る。先に述べたように連結後は、連結点がほとんど剛体的な変位をし全てのケーブルが正弦波的な挙動を示すもの（形状a）と連結点が振動の節となるもの（形状b）に分かれる。固有振動数に関しては、形状aの場合振動数のより高いケーブルと連結してある図-4.5の方が高くなる。これに対し形状bの場合は連結点によって形成されるサブスパン長が固有振動数を決定するため、同じサブスパンが支配的なモード2を比較してわかるように振動数はほとんど変わらない。次に固有振動モード形状に関しては形状aの場合はあまり差が無い。これに対して形状bの場合はモード2、3および5を比較して明らかに、図-4.10では連結点が完全なサブスパンとなり、連結点によって形成される2つのサブスパンのうち1方のみが振動するのに対し、図-4.5では連結点に変位し、さらにモード5で顕著なように全てのサブスパンの振動が発生する。したがって振動数の相違の影響としては、最低次の振動数を向上させる効果と振動する部分を増やし、換算質量を増加させる効果があると考えられる。

最後に本来重量の影響を見る目的で行ったケース8では着目ケーブルと非着目ケーブルが同時に大きく振動するモードがモード5のみとなり、振動数の離れたケーブルは連結点でばねの様な作用はするが、等価重量を増やすようにはならないと考えられる。

(2) 他のケーブルの構造減衰の影響

まずケース6と12に関しては形状aの場合ほぼケーブル独立時の減衰率となっており、構造減衰が有利に付加されたとは考えられない（図-4参照）。次に形状bの場合の構造減衰を計算ケース6、9、11、12について図-5にまとめる。図中の直線は図-2に示したケーブル独立時の構造減衰である。図より振動数を比較の基準とすれば、連結後の構造減衰率は連結前のケーブルよりも全て減衰率が低下していることがわかる。これはサブスパンが振動するモードでは、同一ケーブルの連結点に対して反対側のサブスパンの振動が起こりにくいいため、ケーブル全体が正弦波的に振動する独立時よりも減衰力を受ける部分が少なくなるためと考えられる。ただし、振動数を比較の基準とせずに連結前の構造減衰と比較して減衰が向上している点では制振効果があると評価できる。

さらに図-5を用いて着目ケーブルに減衰係数を導入した場合（○、□）としない場合（△、▽）を比較する。この場合、必ずしも減衰は1/3とはなっておらず、着目ケーブルが大きく振動する場合は1/3よりも大きく、その逆の場合は極めて小さくなっている。これは構造減衰は最も大きく振動するケーブルの影響が強いことを示しており、その他のケー

ブルの減衰率が大きい場合には減衰は付加され、その逆の場合は減衰は小さくなることがわかる。

以上の結果より、ケーブル自体の応力変動によってもたらされる構造減衰率は最も大きな振動が発現するケーブルの独立時の構造減衰と大きく変わることはないと考えられる。

(3) 重量の効果

ケース8および9は重量の効果を見るために、着目ケーブル以外の重量を1/2として計算したものであるが、振動数が変化するため重量の効果は明確とならなかった。また振動数を変化させない場合として、表-3の計算の他に張力と重量を同じ比で変化させた計算も行ったがここでも張力の影響を分離できず、結局重量の効果は定量的に評価できなかった。

重量の効果が予想される結果としては、まず図-6に示すように、ケース8とケース9でモード1を比較した場合、着目ケーブル以外の減衰係数を0と置いたケース9は、非着目ケーブルが大きく振動するモード4を除きケース8の1/2以上であり、ケース6と11のよりも概ね大きい。これは非着目ケーブルの重量が小さかったことが減衰を減少させるように働く影響を小さくしたとも考えられる。またケース6において連結後のモード形状を見ると、一つのケーブルだけが振動するケースが存在しなくなるため、換算質量は増加し、同じ振動エネルギーに対する振幅は小さくなることが予想された。

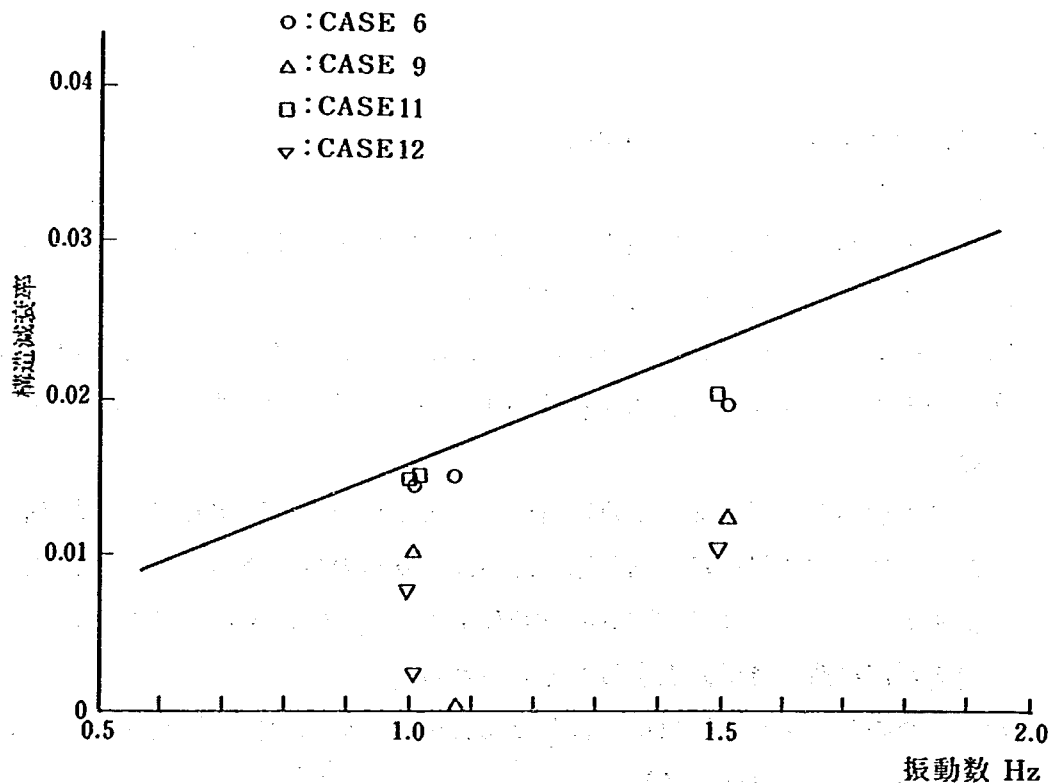


図-5 サブスパン振動の構造減衰

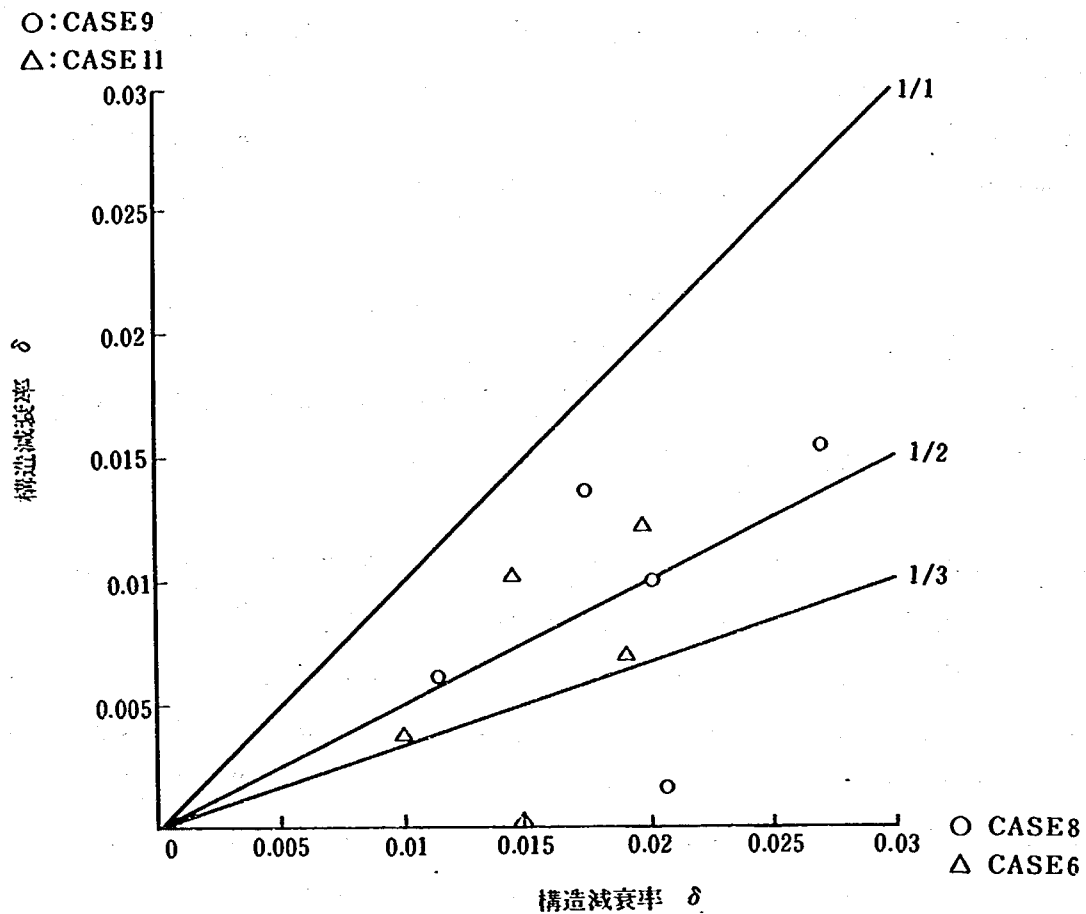


図-6 重量の軽い場合の減衰率

2.4.2 全橋モデルにおけるケーブルの振動

(1) 連結の効果

計算ケースNo. 1 と No. 3 の固有振動数およびモード形状を比較することにより、ケーブルの連結による変化として次の事がわかる。

- ① ケーブルの固有振動数が上がる。(Mode 1 以外の同一番号の振動モードの比較)
- ② 一本のケーブルが独立に振動するモードが存在しなくなる。(Mode 2 ~ 5 までの比較)
- ③ 最上段から最下段までの連結前の振動数のが幅広く変化しているため、連結を行った場合には連結部材が伸縮し連結点が弾性支承の様な挙動を示す固有振動モードが発生する。(Case 3 および Case 5 の Mode 2)。したがって連結部材がエネルギーを消費すれば構造減衰が向上すると考えられる。
- ④ 一つのケーブルの振動に着目した場合モード形状の似た振動数の近い固有振動モードが発生する。(図-7)
- ⑤ 連結部材の伸縮が認められるため、連結ケーブルがダンパーとして作用する効果は十分に考えられる。(図-4.3および4.4)

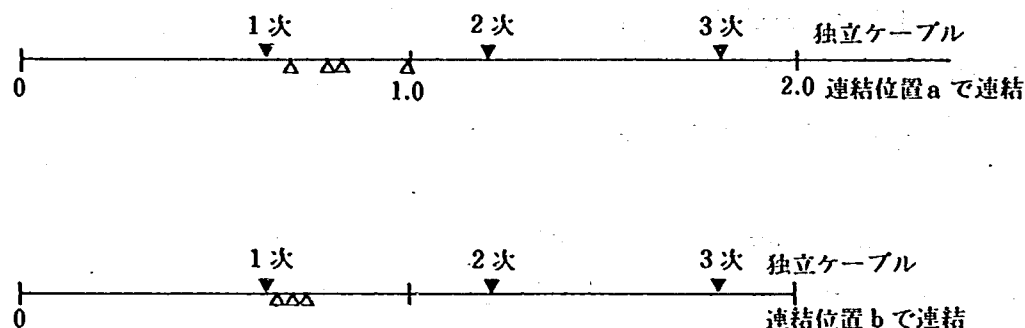


図-7 連結後のケーブルの固有振動数

(2) 連結の位置

計算ケースNo. 3とNo. 5の固有振動モードを比較すると、固有振動数がNo. 5のケースで小さくなっていることがわかる(それぞれの同一番号の振動モードの比較)。これは連結点が中間点に近づくほど連結点とケーブル定着点の支間が小さくなり、見かけ上No. 3のほうがケーブル長が短くなったためと考えられる。その他に顕著な効果は見あたらない。

(3) 中間橋脚の影響

図-4.1と図-4.2を比較すると、中間橋脚が存在しても、ケーブルが独立に振動するモード (Mode 2～4) は変化しない。しかし桁の振動するMode 5では中間橋脚のある場合桁の振幅に対してケーブルの振幅がかなり大きくなっている。また、図-8に示す過渡応答解析を比較してわかるように桁がビートを打つ振動が発生したり、ケーブルの振幅に違いが生ずることがわかる。以上から実橋においても桁とケーブルは密接な関係を有すると考えられる。

2.4.3 オイルダンパーの効果

図-9に一定の位置において粘性減衰係数 c を変化させた場合の減衰率の変化を示す。ケーブルの減衰率は c の増大に伴い必ずしも増大しない。これは図-10に示すように、 c が増大するとダンパーの位置で振動が生じなくなり、新たにダンパーを節とする固有振動が発生するためである。これはある位置でオイルダンパーによって付加できる減衰には上限があることを意味する。また図-9.1と2を比較すると、最大の付加減衰率が得られる c は、 ℓ_0/ℓ が大きい(ダンパーの位置が高い)ほど小さくなるが、同じ c に対してはダンパーの位置が高いほど大きな減衰が付加され、上限の値も大きくなる。

ところで、ケーブルに設置したダンパーの効果について簡易式を求める。

1次モードに関して、ケーブルの振動波形は

$$y(x, t) = a \sin(\pi x / \ell) \sin(2\pi f t) \dots\dots\dots (1)$$

ここに a : 振幅 ℓ : ケーブル長 f : ケーブル振動数

$t=0$ においては、ケーブルのエネルギーは全て運動エネルギー E となっており、次のように表される。

$$E = \int_0^{\ell} (m(x)v(x,0)^2/2) dx \dots\dots\dots(2)$$

(2)式において $v(x,0)$ は(1)の微分によって得られ

$$v(x,0) = 2\pi fa \sin(\pi x/\ell) \dots\dots\dots(3)$$

したがって

$$E = \pi^2 \ell f^2 m a^2 \dots\dots\dots(4)$$

ここに m : ケーブル単位当り質量

一方、ダンパーの粘性減衰係数を c とし、ケーブル端部からダンパーの設置位置までの距離を ℓ_0 とすると、ダンパーが一周期の間になす仕事、すなわち振動エネルギーの減少量 E_c は

$$\begin{aligned} E_c &= \int_0^{1/T} (cv)v dt \\ &= 4\pi^2 f^2 a^2 c \sin^2(\pi x/\ell) \int_0^{1/T} \cos^2(2\pi ft) dt \dots\dots\dots(5) \\ &= 2\pi^2 f a^2 c \sin^2(\pi x/\ell) \end{aligned}$$

ただし減衰が小さいことから、振幅は1周期毎に不連続に減少すると見なしている。

(4)式より振動エネルギーと振幅の関係は $\sqrt{E}$ に比例し

$$\begin{aligned} a(t+T)/a(t) &= \sqrt{(E-E_c)/E} \\ &= \sqrt{(1-E_c/E)} \\ &\approx 1 - E_c/(2E) \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

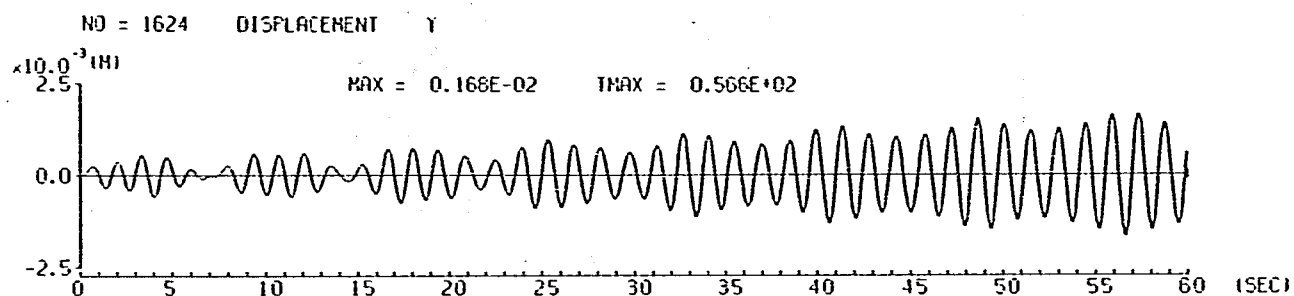
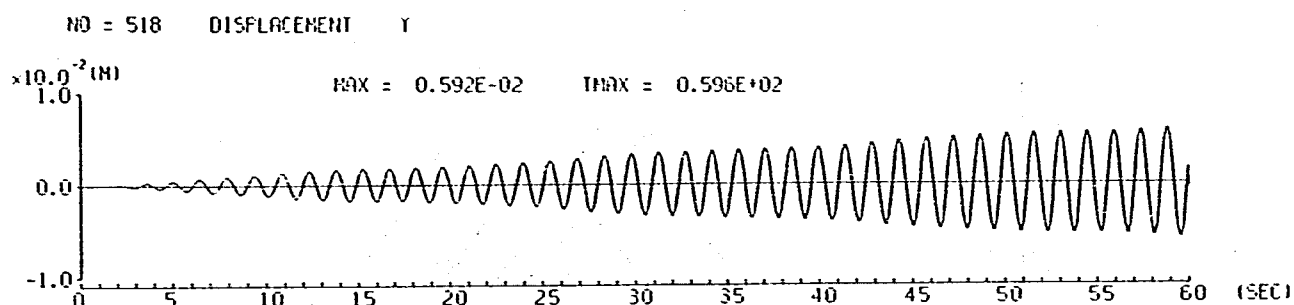
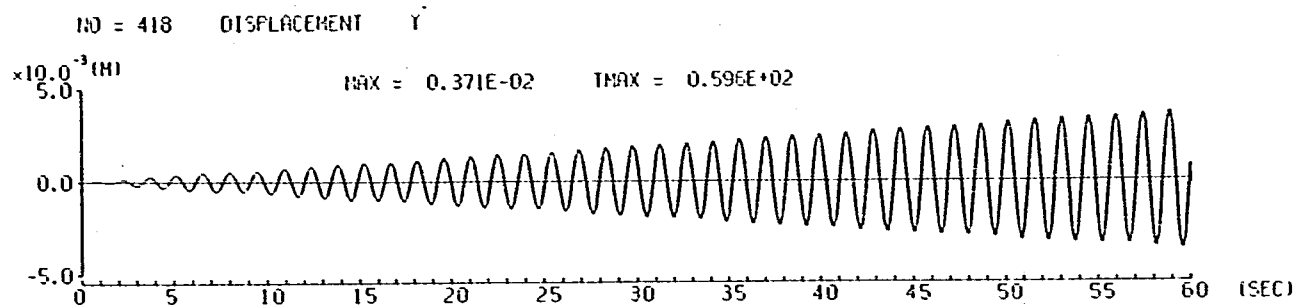
したがって構造減衰率は

$$\begin{aligned} \delta &= -\log(1 - E_c/(2E)) \\ &\approx E_c/(2E) \end{aligned}$$

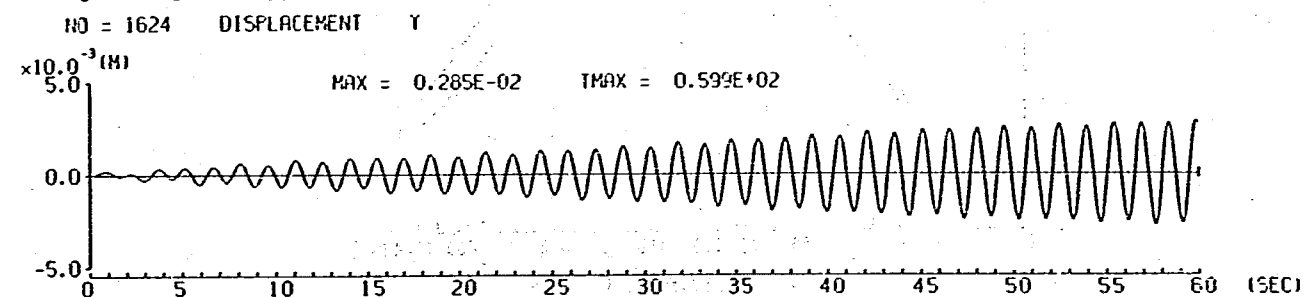
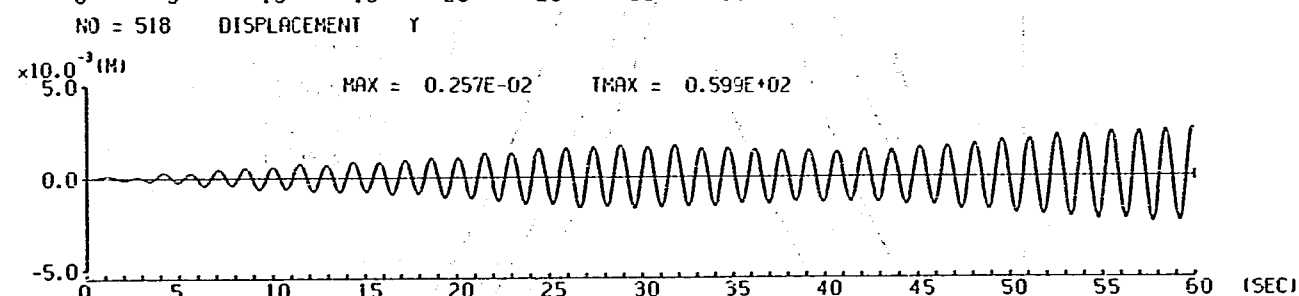
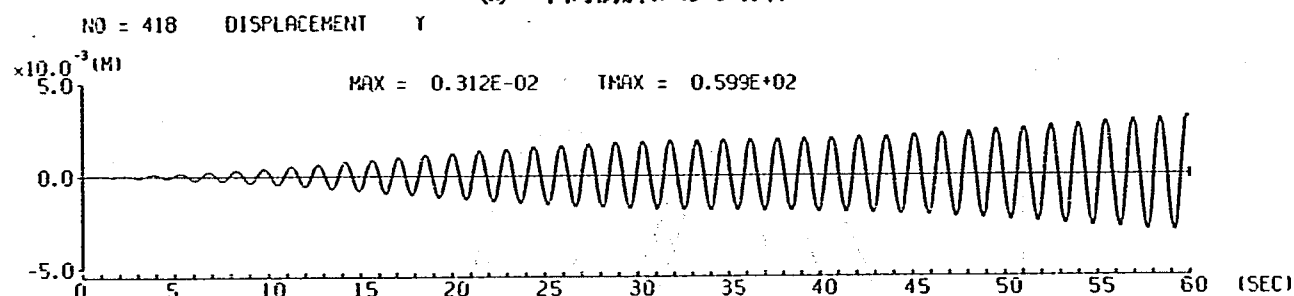
$$= \frac{2c}{\sqrt{mT}} \sin^2 \frac{\pi}{\ell} x \dots\dots\dots(7)$$

ここに T : ケーブル張力

図-11には、(7)式と、表-3.2に示した計算値を比較する。図より c が小さい時に(7)式がよい一致を示しているのがわかる。また図-12.1, 2にはそれぞれケーブルの重量、張力を変化させたものを示す。両者はほぼ同じ曲線が得られており、(7)式において m と T が等価な関係にあることと整合している。また1次モードに関しては、張力や重量の平方根の逆数に比例している。



(a) 中間橋脚がある場合



(b) 中間橋脚の無い場合

図-8 中間橋脚の影響

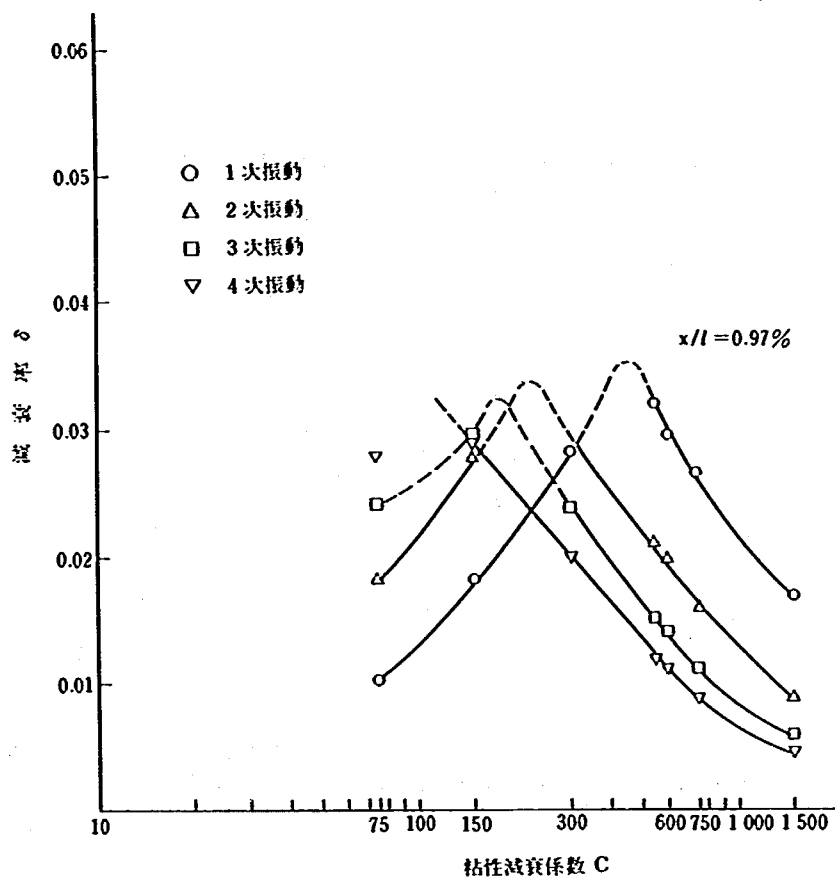


図-9.1 ダンパーの効果 (その1)

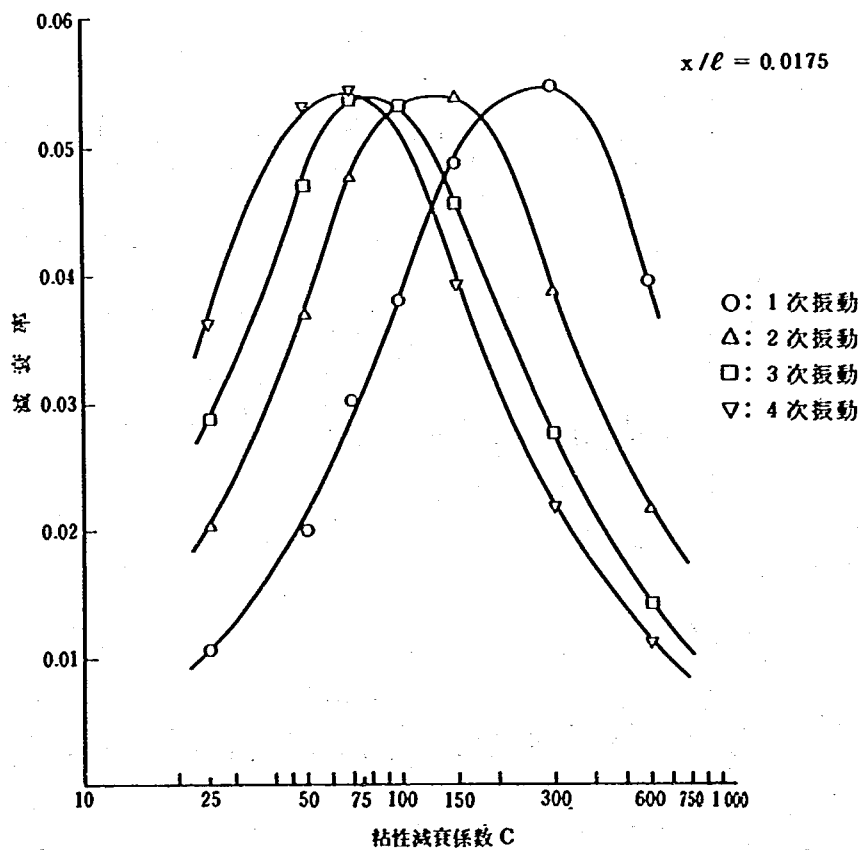
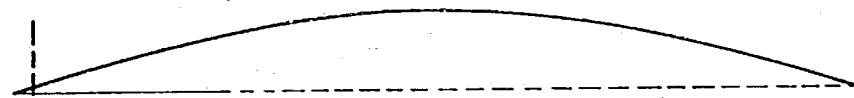
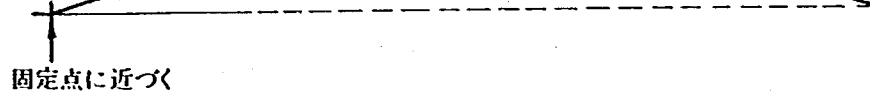


図-9.2 ダンパーの効果 (その2)

ダンパー設置位置



(a) 弱いダンパー



(b) 強いダンパー

図-10 ダンパーの強さと固有振動モード形状

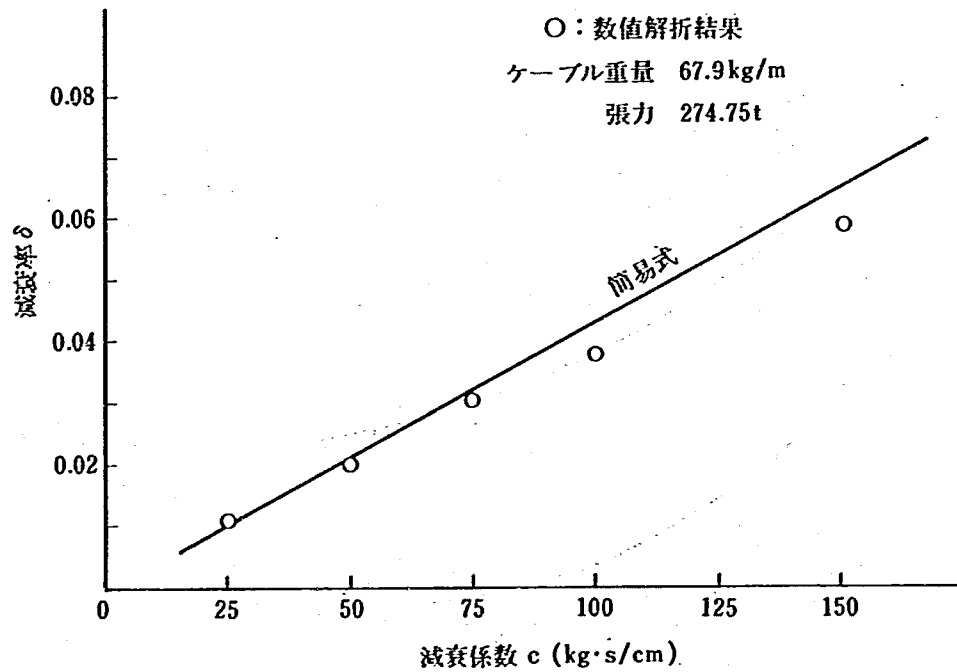


図-11 簡易式と解析値の比較

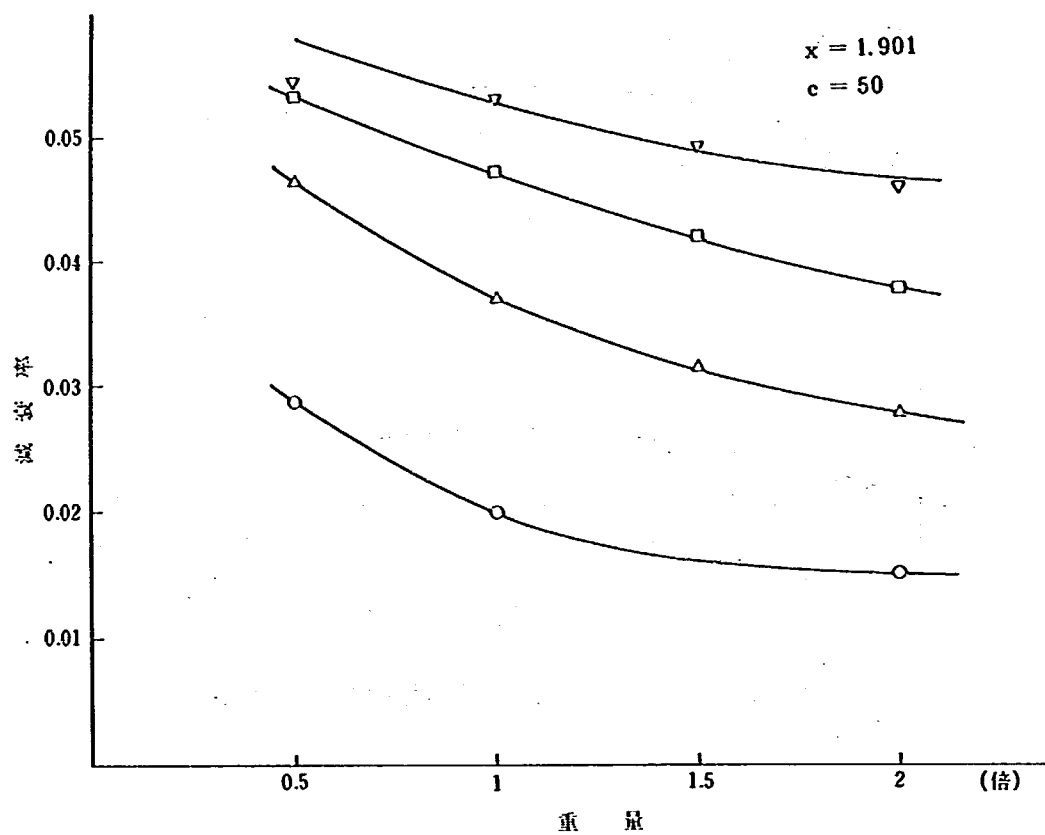


図-12.1 ケーブル重量の影響

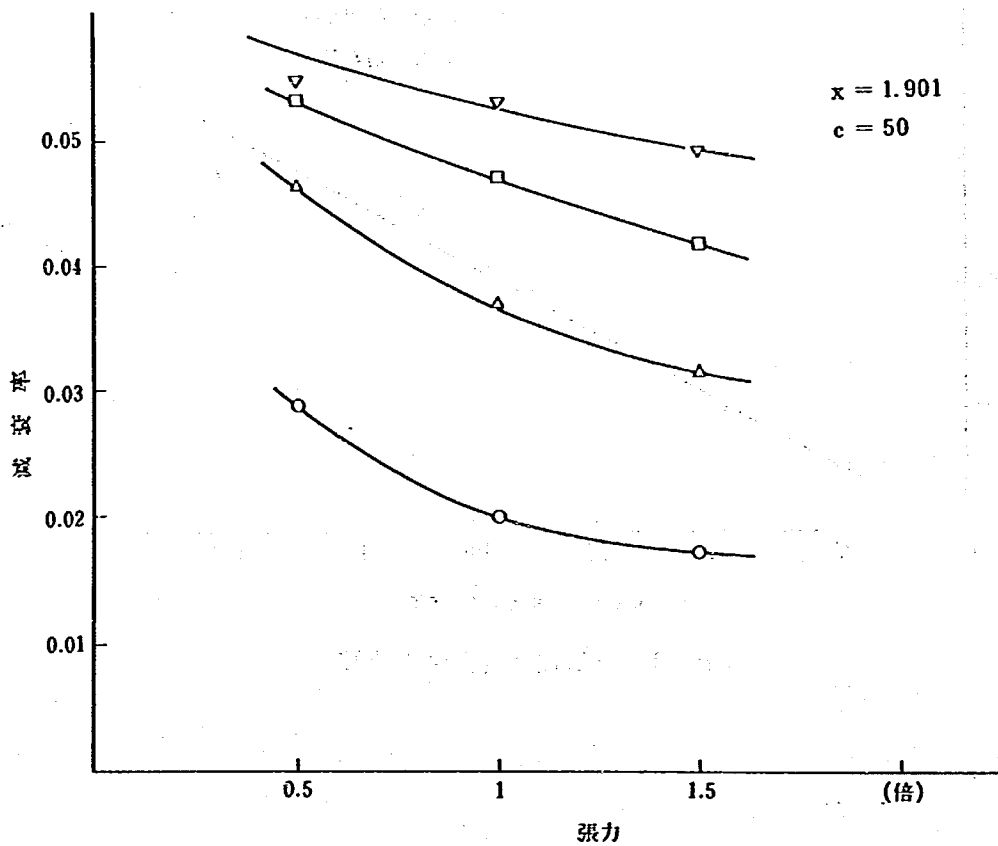


図-12.2 ケーブル張力の影響

3. 他の研究の成果

3.1 事例調査

3.1.1 ケーブルの振動に関する事例調査

斜張橋のケーブル振動に関する実態把握を目的として、阪神高速道路公団によって国内の主な斜張橋（53橋）についてアンケート調査が実施された。

その結果ケーブルの振動が認められた橋梁は以下のとおりとなった。

- | | |
|-----------------|---------------------|
| ①何等かの振動が発現 | 16橋／53橋 |
| ②ウェイクギャロッピング（注） | 5橋／7橋（並列ケーブルを有するもの） |
| ③レインパイブレーション | 6橋／21橋（PE管被覆） |
| ④渦励振 | 8橋 |
| ⑤その他 | 2橋 |

注：②においてウェイクギャロッピングが発現していないとした2つの橋梁のうち1橋ではケーブル断面形状が六角形であるためにギャロッピングが発現している。実橋ではギャロッピングが目立ったため、仮にウェイクギャロッピングが発現していても、この現象が発現していると判断することは困難であったと考えられる。

3.2 振動の特性及び対策

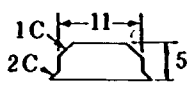
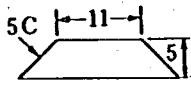
3.2.1 レインパイブレーション^{2)～4)}

(1) 特性

- イ．レインパ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大きくなる。
- ロ．レインパイブレーションは実際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も問題はない。
- ハ．レインパイブレーションは対数減衰率 δ で約0.02程度付加すると振動がおさまる。
- ニ．レインパイブレーションは、乱れによって低減される可能性があるが定量的には評価できない。

(2) 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、構造力学的対策としてはケーブルの相互連結、オイルダンパーが効果的である。荒津大橋では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かめられた。また空気力学的対策として、図-13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かめられている。また図-14に示すVストライプをつける方法も提案されている⁵⁾。

対 策	H(mm)	W(mm)	θ 度	C1(mm)	C2(mm)	形 状
A	5	11	30	2	1	
B	5	11	30	5	0	

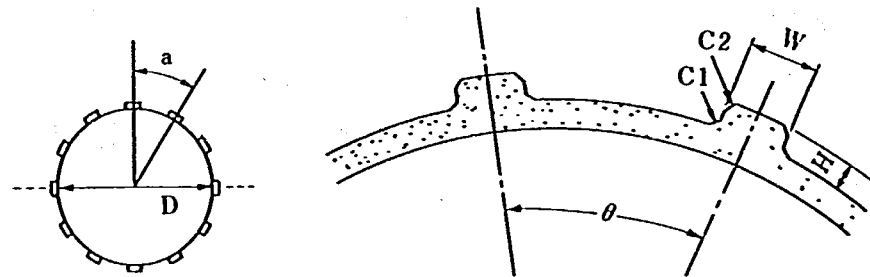


図-13 平行突起

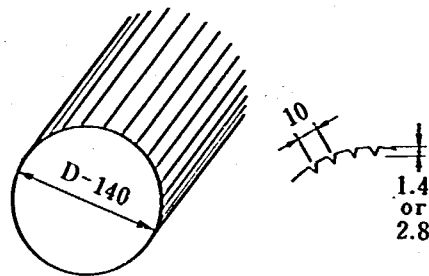


図-14 Vストライプ方式

(4) 今後の研究展望

レインパイプレーションに関しては、昭和63年度までに多くの機関で実施された実験によって、メカニズムがほぼ解明され、制振対策も明かとなってきた。今後はVストライプ方式の有効性に関して平行突起方式との比較も行いながら多面的な検討を行い、レインパイプレーションの一般的な空気力学的制振方法が確立することが望まれる。

3.2.2 ウェークギャロッピング

(1) 特 性

実態調査の範囲では、並列ケーブルを有する斜張橋のほとんどにウェークギャロッピングの発現が見られ、発生する可能性のかなり高い現象と考えられる。

(2) 制振対策

ケーブルの相互連結方式が現在唯一の実績のある方法と言える。実橋ではケーブルは少なくとも2カ所で連結されている。なお同じ段の平行ケーブルの相互連結のみでは制振対策として効果を期待し難いことがほとんどの橋梁で確認されている。

昭和60年に行われた檳石・岩黒島橋に関する実験⁶⁾によると、ウェークギャロッピングの負減衰の絶対値は、高々-0.05程度であり、構造力学的な制振手法を検討する際の目安となるが、実橋での観測データおよび実験データの蓄積は不十分である。

(4) 今後の研究展望

ウェークギャロッピングは並列ケーブルでかなり高い可能性を持って発現する現象と考えられ、制振装置の検討は必ずなされるべきと考えられる。それだけに今後の研究としては、レインバイブレーションにおける平行突起方式のように有効な空気力学的制振対策の開発はかなり重要性が高い。また、同じ理由で並列ケーブルにかわる、効率的なケーブルの配置法に関して検討がなされることも重要である。

3.3 模型実験

数値解析と同様の目的で沖縄の羽地ダム湖水橋の1/40の縮尺を有する模型を使用して固有振動モードの計測と過渡振動の計測を行った。実験結果の要約を以下に示す。

- ① 連結点が節となるような振動に関しては構造減衰はあまり変わらない。
- 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。
- 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に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、効果に関する規則付けや因子の分離はかなり難しい。

4. 制振装置に関する考察と今後の課題

本業務で行った数値解析とその他の研究の成果より、制振装置に関して以下に取りまとめられる。

4.1 ケーブルの連結によって振動が抑えられる機構

(1) 振動数の向上

ケーブルを連結することによりケーブルの最も振動しやすい固有振動数は、連結点と定着部を見かけ上のケーブル長（以下サブスパンと呼ぶ）とする振動数となり最低次固有振動数は連結段数が多いほど大きく増大する。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、振動数が大きくなるほど振幅は小さくなることが確かめられている。またウェークギャロッピングの特性は必ずしも明らかではないが、少なくとも発現風速の向上あるいは振幅の低減のいずれかに寄与するはずであり、振動数が向上する効果は制振効果にかなり貢献していると考えられる。

(2) 剛性の向上

ケーブルの連結によるサブスパンを考えた場合、変形量に対する復元力はサブスパンが短いほど大きくなり、剛性が向上したことを意味する。これは振動数の向上と密接に関係する効果であるが、同じ振幅で蓄積される振動エネルギーは剛性が高いほど大きく、ケーブル振動を発散振動と考えなければ振幅の低減につながる。

(3) 減衰の付加

数値解析によっても、また模型実験によっても連結による構造減衰の明確な向上は認められなかった。しかし、模型実験では連結部材の特性によって付加的な構造減衰は変化し、また数値解析においても、連結部材の伸縮が認められたため、連結材料の伸縮にともなう生じる摩擦力による振動エネルギーの散逸の効果がかなり大きいことが予想される。したがって実橋でも、連結材として用いられているワイヤーロープのような不均質な部材によって構造減衰が付加されるものと考えられる。

(4) 振動エネルギーの蓄積に関して

ケーブルの連結によって他のケーブルにエネルギーが伝達し、一本のケーブルが独立に振動するモードが存在しにくくなる。したがってある一つのケーブルに働く空気力は他のケーブルの振動を起こし、その振幅は小さくなる。しかし模型実験結果によると、いくつかの固有振動数に一致する周期の起振力を同時に別々のケーブルに作用させた時に発達する振幅は、別個に起振力を作用させたときの振幅の和と余り変わらないため、空気力がモード毎に働くならば一つの固有振動モードで他のケーブルに振動エネルギーが渡されても別の振動モードで他のケーブルから振動エネルギーが受け渡され、総合的にこの効果は余り期待できない。

ところで、一本のケーブルに着目した場合、連結後のケーブルはその張力とサブスパン長

が支配的な弦に近い振動数の他に、他のケーブルの張力とサブスパン長が支配的な固有振動数でも振動する。この振動数はマルチケーブルの斜張橋においてはケーブルの長さが徐々に変化するためかなり近い値であり、一本のケーブルには振動モード形状の殆ど変わらない振動数の近接した振動モードが数多く有することとなる。この場合空気力は、近接した数多くの振動数全てを励起するようには働かず、最も振動を起こしやすいモードだけを励起するよう働く可能性があり、このようなときにはそのモードにおいて支配的なケーブル以外のケーブルに関してはそのモードでの振動は強制振動となり（ただし空気力はこの場合でも全てのケーブルにそのモードで振動するよう働き、単独ケーブルに働く空気力よりははるかに大きいと考えられる。）、それぞれのケーブルにそれぞれ自励的な空気力が働く場合よりも、ケーブルに蓄積される振動エネルギーは小さくなり、全体の振幅が減少するといった効果も考えられる。

4.2 ダンパーの効果

ダンパーの効果はダンパーの性能を把握していれば数値計算でほぼ評価できると考えられる。オイルダンパーの場合、あまり粘性が大きいと、ダンパーの存在する位置がサブスパンを形成し効果が落ちるため、ある位置に関してオイルダンパーによる付加減衰には上限がある。

4.3 今後の課題

- (1) ケーブルの減衰のメカニズムを反映したモデルを考案し、ケーブル連結による減衰の向上の効果をより正確に評価できるようにする。
- (2) 模型実験を再現する数値解析を行いケーブル連結の効果をより明確に予測できるようにする。

5. 予測と対策に関する考え方

5.1 安全性について

本来、ケーブルの曲げに関する疲労実験によって、安全性に関して目安がつけられるようになることが望ましい。しかし今のところケーブル定着部の曲げ応力に関して安全性が確かめられたことはないため、許容振幅を数値で与えることはできない。したがって当面は人の目に振動が明かな場合に必ず何等かの対策を施すこととする。

5.2 振動の予測

ケーブルの振動の発生状況や固有振動解析によると、ケーブルの振動は、基本的には桁やタワーとは無関係に、独立系のケーブルとして振動しているものと考えられる。また、最近の一般的な設計方法で設計されたマルチケーブルの斜張橋のケーブルは、これまで振動が発現した斜張橋のケーブルと特別に異なったものとなることは考えられない。したがって並列ケーブルを有する斜張橋ではウェークギャロッピングが、その他の斜張橋においてもPE管を有するマルチケーブルの斜張橋であればレインバイブレーションが発生する可能性はかなり大きい。なお、橋梁の特殊性として、桁の振動数とケーブルの振動数の関係でケーブルの振動エネルギーが桁で消費される可能性があり、その場合には振動が発現しない可能性はある。しかし施工時の誤差を考えると、あらかじめこの効果を期待することは今の段階ではできない。したがって斜張橋の設計においては、基本的にはケーブルの振動は発生するものと考え、設計の段階では制振装置について必ず考えておくのが良いと考えられる。ただし①ケーブルの振動によってケーブルが直ちに破断することはないものと考えられること、②振動の要因と考えられる条件に関して目立った差のない条件であっても振動が発生する場合としない場合があるなど振動の発生に関する要因が完全に把握されていないため、発生の有無を事前に判定できないのが現状であることを考慮すれば、制振装置は予め設置が容易となるように設計時に配慮するにとどめて、実際の設置は実橋の様子をうかがった後としても問題はないと考えられる。

5.3 制振装置について

(1) 空気力学的制振装置

空気力学的制振装置に関しては実績は皆無である。しかし、昭和63年度の阪神高速道路公団の検討では、ケーブル径が160mm～180mmの範囲のケーブルに関して平行突起を設けることがレインバイブレーションの効果的な対策となることが明かとされた。ただし平行突起方式は現在風洞実験で効果が確認されただけの段階であり、製作や耐久性など今後検討すべき問題も多いと考えられる。

一方、ウェークギャロッピングに関しては十分な実用性を持った空気力学的な制振方法はまだ開発されていない。

(2) 構造力学的制振装置

最も実績のある制振方法はケーブルの相互連結である。この方法は、振動数の向上、剛性の向上、そして連結部材の伸縮及び振動モードの変化からもたらされる構造減衰の向上といった効果によって振動を抑えるという検討結果がある。連結方法としては連結点と他の連結点あるいは定着部の間隔が短くなり、かつ非連結時の1次から4次までの振動の腹に近い位置を連結するのが効果的である。この連結の効果は付加減衰に関しても、振動数の向上に関しても連結点が多いほど効果があると考えられ、振動数が制振に役立つだけ向上するためには、2カ所以上の連結が必要と考えられる。しかしレインパイプレーションの場合は、必要な付加減衰が小さいため、名港西大橋のようにケーブル長の0.2倍の位置1カ所のみで連結しても十分と考えられる。

なおケーブル相互連結によって付加される構造減衰のうち、連結部材によってもたらされる部分はかなり大きいと考えられ、連結する部材としては伸縮によってエネルギーが消費される部材の方が付加的な減衰を発生させるものと考えられる。また、連結部材の剛性は低いほど付加的な構造減衰の向上が期待できる。したがってまず材料としては均質な鋼線を用いることは避け、ワイヤー・ロープのように、張力変化によって内部でエネルギーが消費されるような材料を選ぶ必要がある。また、強度に関しては連結後の振動解析を実施して必要以上の強度を持つ連結材を用いないようにしなければならない。

他の制振方法としては橋桁とケーブルをオイルダンパで連結する方法やケーブルにストックブリッジダンパを取り付け構造減衰を付加する方法の実績がある。レインパイプレーションについては必要な付加対数減衰が $\delta=0.02$ 程度と言われており、この値を目安としてある程度の安全性を見込んでおけば制振可能と考えられる。またこれらの減衰装置の効果は、数値計算によっても評価しやすいので、数値計算によってダンパーの性能と取付位置を検討し、試験施工によって効果を確認すれば十分な対策となる。ただしウェークギャロッピングに関しては必要な付加減衰がレインパイプレーションよりも高いと考えられ、その値も捉えきれないため、ダンパーの使用は慎重にする方が良いと考えられる。

(3) 仮 制 振

最終的な制振装置を取り付けるまで、何等かの方法で振動を抑える必要性は大きい。レインパイプレーションに関しては、麻ロープでケーブルを結び、橋桁に連結すると効果があった例がある。この場合ロープに張力を入れ過ぎると効果が落ちるといわれる。一方ウェークギャロッピングに関しては仮制振で完全に止めることは困難であるが、平行ケーブルを相互に麻ロープで連結した上で橋桁に連結すると振幅がかなり小さくなり、応力的な問題はなくなると考えられる。

6. ま と め

本検討より得られた成果を以下にまとめる。

- (1) ケーブルの連結によって振動数が向上する、振動数の接近した固有振動モードが発生する、構造減衰が変化するという効果が確かめられ、振動を抑える要因となっていると考えられたが、今後付加減衰の評価、構造系の変化のしかた、そして空気力の作用のしかたなどに関して調査し、総合的にその制振効果の評価が可能となるようにする必要がある。
- (2) ダンパーを使用する場合は数値解析や実験を行い、最も効果的な位置とダンパーの性能を選択する必要がある。
- (3) PE管被覆を有するケーブルに対しては設計時より制振方法を考察する必要があるが、制振装置の設置は実橋の様子を観測した上で決定するのも可能である。
- (4) ウェークギャロッピングの制振対策は相互連結によるのが良い。ただしその連結位置はモード解析を行った上で決定する方が望ましい。
- (5) レインパイプレーションは0.04の対数減衰率を付加できれば、制振方法は特別その種類を問わない。ケーブルの相互連結による場合は、4次モードまでに有効な1カ所で連結すると良い。
- (6) 斜張橋の施工時のケーブルの仮制振のためには麻ロープ等により橋桁とケーブルを連結する方法が有効である。

参考文献

- 1) 山口宏樹, 藤野陽三; ケーブルのモード減衰, 埼玉大学工学部建設系研究報告第17巻, 1987年
- 2) Y.Hikami, N.Shiraishi; RAIN-WIND INDUCED VIBRATIONS OF CABLE STAYED BRIDGES, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 29(1988)
- 3) 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
- 4) T.Yoshimura, T.Tanaka; RAIN-WIND INDUCED VIBRATION OF THE CABLES OF THE ARATU BRIDGE, PROCEEDINGS OF 10TH NATIONAL SYMPOSIUM ON WIND ENGINEERING, 1988
- 5) 宮崎正男; 斜張橋ケーブルの空気力不安定振動と制振対策, 第10回風工学シンポジウム論文集, 昭和63年
- 6) 本州四国連絡橋の耐風に関する調査研究報告書, 土木学会・本州四国連絡橋耐風研究小委員会, 昭和61年

参考資料 振動解析の理論およびプログラムの流れ

§ 1 振動解析の理論

1.1 運動方程式

外力を受ける多自由度構造系の運動方程式は次式で示される。

$$[M] \{\ddot{x}\} + [C] \{\dot{x}\} + [K] \{x\} = \{f\} \quad (1)$$

ここに, $[M]$: 質量マトリックス

$[C]$: 減衰マトリックス

$[K]$: 剛性マトリックス

$\{\ddot{x}\}, \{\dot{x}\}, \{x\}$: 系の加速度, 速度, 変位ベクトル

$\{f\}$: 外力ベクトル

である。各マトリックス, ベクトルのサイズは, 構造系の自由度数 n である。

1.2 複素固有値解析

(1)式と, 恒等式: $[K] \{\dot{x}\} - [K] \{\dot{x}\} = \{0\}$ を併せて, (2)式を得る。

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & -K \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \dot{x} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & K \\ K & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ x \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} [A] &= \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & -K \end{bmatrix}, & [B] &= - \begin{bmatrix} C & K \\ K & 0 \end{bmatrix} \\ \{y\} &= \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ x \end{Bmatrix}, & \{g\} &= \begin{Bmatrix} f \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

と変数変換して, (4)式となる。

$$[A] \{\dot{y}\} - [B] \{y\} = \{g\} \quad (4)$$

$([A]^{-1} [B])$ の複素固有値マトリックスを $[A]$, 複素モードマトリックスを $[\Psi]$ とすれば,

$$([A]^{-1} [B]) [\Psi] = [\Psi] [A] \quad (5)$$

あるいは

$$[B] [\Psi] = [A] [\Psi] [A] \quad (6)$$

である。また、ベクトル $\{y\}$ をモードマトリックスを用いて、

$$\{y\} = [\psi] \{z\} \quad (7)$$

とする。(7)式を(4)式に代入して、左より $[\psi]^T$ を乗じる。

$$[\psi]^T [A] [\psi] \{\dot{z}\} - [\psi]^T [B] [\psi] \{z\} = [\psi]^T \{g\} \quad (8)$$

(8)式の左辺第1項、第2項の係数マトリックスは、固有モードの直交性により、対角マトリックスとなる。その結果、(8)式は非連成化され、 $\{z\}$ に関する $2n$ 個の独立方程式となる。

$$[\psi]^T [A] [\psi] = [I] \quad (I: \text{単位マトリックス}) \quad (9)$$

となるよう $[\psi]$ を規格化すると、(6)式より、

$$[\psi]^T [B] [\psi] = [A] \quad (10)$$

となる。従って、(9)、(10)式より(11)式を得る。

$$\{\dot{z}\} - [A] \{z\} = [\psi]^T \{g\} \quad (11)$$

$[A]$ は対角マトリックスであり、その要素を λ_j 、 $[\psi]$ の要素を ϕ_{jk} とすると、(12)式のように示すことができる。

$$\dot{z}_j - \lambda_j z_j = \sum_k \phi_{jk} f_k \quad (j = 1 \sim 2n) \quad (12)$$

ここに、 j はモード次数を、 k は自由度番号を示す。

1.3 過渡応答解析

構造系が外力を受ける場合の過渡応答は、(12)式の微分方程式を解析して求める。(12)式をラプラス変換して、(13)式を得る。

$$s \mathcal{L}[z_j] - \lambda_j \mathcal{L}[z_j] = \sum_k \phi_{jk} \mathcal{L}[f_k] \quad (13)$$

ここに、 s はラプラス演算子、 $\mathcal{L}(\)$ はラプラス変換を示す。(13)式より、

$$\mathcal{L}[z_j] = \frac{1}{s - \lambda_j} \sum_k \phi_{jk} \mathcal{L}[f_k] \quad (14)$$

(14)式を逆ラプラス変換して、

$$\begin{aligned} z_j &= \sum_k \phi_{jk} \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{1}{s - \lambda_j} \cdot \mathcal{L}[f_k] \right] \\ &= \sum_k \phi_{jk} \mathcal{L}^{-1} \left[L[e^{\lambda_j t}] \cdot \mathcal{L}[f_k] \right] \end{aligned}$$

$$= \sum_k \phi_{jk} \int_0^t e^{\lambda_j(t-\tau)} \cdot f_k(\tau) \cdot d\tau \quad (15)$$

を得る。(15)式の積分を実行して $\{z\}$ を求めた後、(7)式より $\{y\}$ を、(3)式より $\{x\}$ を求めることができる。

1.4 減衰マトリックスの作成法

(1) 各要素ごとに、減衰係数を与える。

$$\begin{Bmatrix} F_i \\ F_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{ii} & C_{ij} \\ C_{ji} & C_{jj} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{x}_j \end{Bmatrix}$$

ただし、 F_i, F_j : 節点 i と j の減衰力

C_{ij} : " の間の減衰係数

x_i, x_j : " の速度

(2) 非減衰モードごとに減衰比を与える。

減衰マトリックスとモードごとの減衰比との間に次の関係がある。

$$[\phi]^T [C] [\phi] = \begin{bmatrix} & 0 \\ & \text{---} 2h_i w_i \text{---} \\ 0 & \end{bmatrix}$$

ここに、 $[\phi]$: 非減衰モードマトリックス

h_i, w_i : i 次モードの減衰比と固有振動数

である。従って、減衰マトリックスは次式となる。

$$[C] = [\phi]^{-T} \begin{bmatrix} & \text{---} 2h_i w_i \text{---} \\ & \\ & \end{bmatrix} [\phi]^{-1}$$

1.5 一自由度系における複素固有値

固有振動数： ω および減衰比： h を持つ一自由度系について、複素固有値を求めると以下のようになる。

$$[M] = [1], \quad [C] = [2h\omega], \quad [k] = [\omega^2]$$

とにおいて、(5)式より固有値を求めると、次の共役複素数が得られる。

$$\lambda = -h\omega \pm i\omega\sqrt{1-h^2}$$

複素固有値の実数部を α 、虚数部を β とすると、

$$\lambda = \alpha \pm i \beta$$

固有振動数，減衰比は次式で示される。

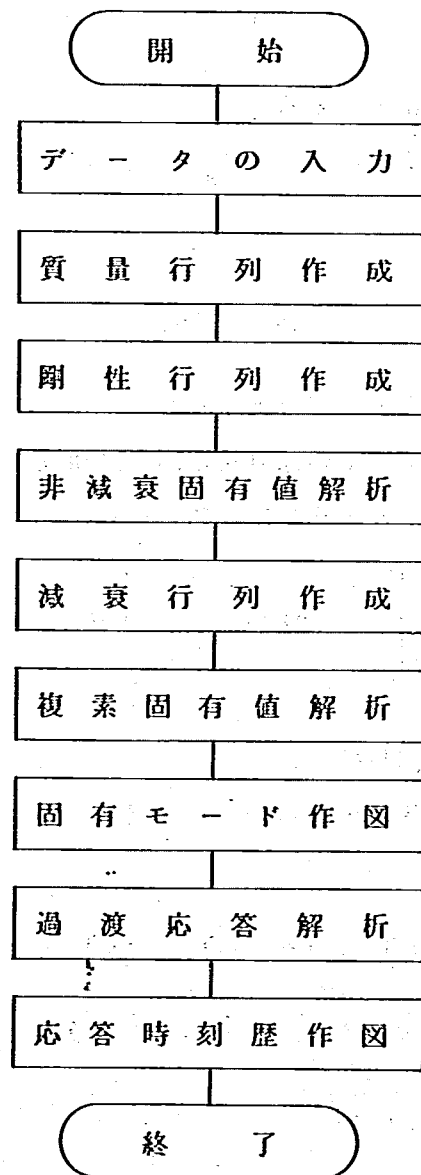
$$\omega = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$$

$$h = \frac{-\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}$$

§ 2 プログラムの構成

2.1 ブロック・チャート

§ 1 に示した振動解析プログラムのブロック・チャートを以下に示す。



斜張橋ケーブルの制振対策に
関する調査報告書

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第2761号
1989年2月
横山 功一, 日下部毅明
伊関英彦

キーワード: ケーブル振動, 複素固有値解析, レインパイプレーション,
ウェークギャロッピング, 制振方法

要 旨 最近急増する斜張橋のケーブルのかなり大きな振幅の振動を構造的に制振
する方法を明らかにするため, 複素固有値解析および過渡応答解析のプログラ
ムの作成および解析を行い効果を調査した。その結果ケーブルの連結の効果は, 付加減衰だ
けではなく構造系の変化や, 空気力の作用のしかたなどに関して総合的に評価する必要があ
ること, ダンパーを使用する場合は数値解析や実験を行い, 最も効果的な位置とダンパーの
性能を選択する必要があることが示された。



郵便はがき

切手をはって
下さい

305-□□

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. 4

No. 4

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2761号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印