

斜張橋（女神大橋（仮称））のケーブルの局部振動解析

呉 慶雄*・埜村 隆春**・高橋 和雄***・中村 聖三***

Study on Local Vibrations of Stay Cables
in Megami Steel Cable-stayed Bridge

by

Qingxiong WU*, Takaharu TAOMURA**, Kazuo TAKAHASHI*** and
Shozo NAKAMURA***

Local parametric vibrations of stay cables in Megami steel cable-stayed bridge are studied in the present paper. Natural frequencies of the global modes are obtained by using the three dimensional FEM model and the natural frequencies of the stay cables are obtained by analytical solution. The effect of the cable vibration on the global vibration are evaluated at first. The global motions under the sinusoidally time-varying excitation using the exciter are evaluated by using the method of modal analysis. The local parametric vibrations of the stay cables, which are subjected to time-varying displacement at a support during global motions are obtained and the properties of the local vibrations are discussed.

1. まえがき

斜張橋の長大化に伴い、風、車の走行、起振機実験時に斜張橋全体系の振動によって、支持ケーブル（以下ケーブルと呼ぶ）に局部振動が発生する事例が数多く報告されている^{1)・2)・3)・4)}。この局部振動の発生の原因の要因の一つとして、係数励振振動が考えられており、高橋らは、日本に建設された斜張橋について係数励振振動の可能性を検討している⁵⁾。引き続き、高橋らは実際の鋼斜張橋の大島大橋⁶⁾および天建寺橋⁷⁾を対象として、起振機実験に相当する正弦波加振、走行荷重および地震力を受ける斜張橋の主桁や塔の応答によって生ずるケーブルの局部振動解析を行っている。この結果、走行荷重および地震力を受ける場合には、係数励振振動が起らないことを確認している。

本研究では、女神大橋（仮称、建設中）に起振機実験に相当する正弦波加振によるケーブルの局部振動を評価する。さらに、本研究ではこれまで採用してきた仮定したケーブルの取り扱いの妥当性を検討する。

2. 解析方法

汎用ソフト（TDAPⅢ）を用いて3次元FEMモデル（図-1）による斜張橋全体系の固有振動数を求める。主桁は、橋軸方向の一本のはり要素に置き換える。タワーおよび橋脚は、3次元モデルを用いてモデル化を行う。ケーブルについては、初期軸力のみが作用するトラス部材としてモデル化を行う。拘束条件としては、主桁端部の鉛直方向および橋軸直角成分、回転成分を拘束し、他の自由度はフリーとする。また、上部構造の応答特性を把握するために基礎は剛と仮定し、橋脚基部は全てに自由度を固定し、ケーブルの端部はピン結合とする。

さらに、両端ピンで支持される単一ケーブルの局部振動の固有振動数を解析解によって求める。両者の関係から副不安定領域および主不安定領域において係数励振振動が発生する可能性があるケーブルを選び出す。次いで、起振機実験に相当する周期外力を受ける斜張橋の応答をモード解析法により求める。これによって

平成14年4月18日受理

*大学院生産科学研究科（Graduate School of Science and Technology）

**大牟田市役所（Ohmuta City Office）

***工学部社会開発工学科（Department of Civil Engineering）

得られたケーブルの定着点の相対応答を、係数励振振動を表現できるケーブルの非線形振動方程式の支点変位に代入して、ケーブルの局部振動解析を実施する。

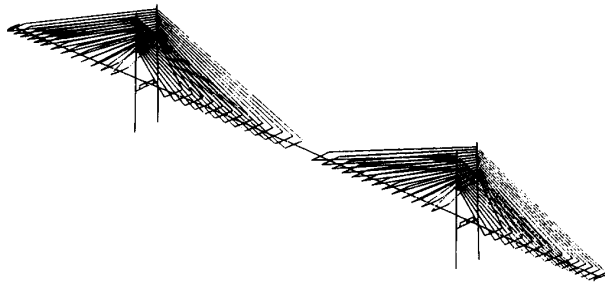


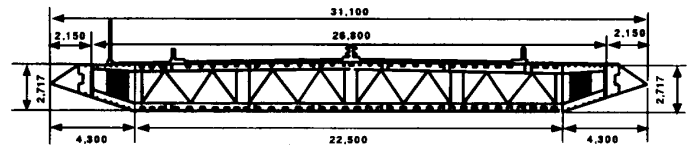
図-1 女神大橋のFEMモデル

3. 解析対象

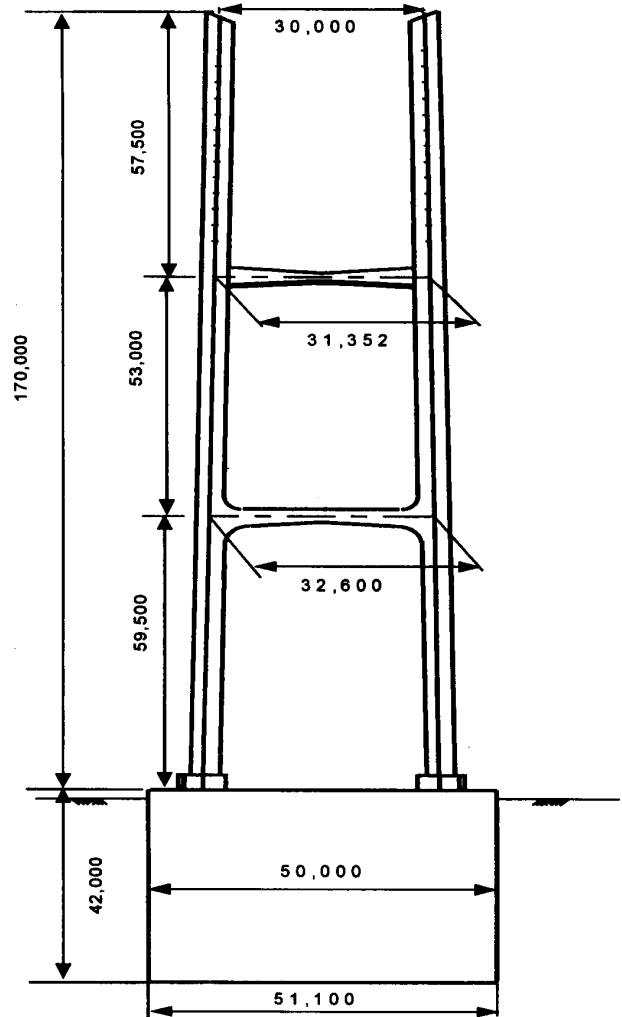
本研究における解析対象の女神大橋（仮称）は、主要地方道長崎南環状線（長崎市大浜町から新戸町までの約5km）が長崎港を横断する位置に架かる橋長880m（200m+480m+200m）の長大橋で、旧建設省および旧運輸省の両省所管事業として整備される計画で着手されている。完成すると、中央径間長で日本では6番目の斜張橋になる予定である。表-1に女神大橋の諸元を、図-2に女神大橋の一般図を示す。

表-1 女神大橋表全体系の諸元

橋長 (m)		880.0
側径間 (m)	左	200.0
	右	200.0
中央径間 (m)		480.0
幅員 (m)		31.1
桁高 (m)		2.717
幅員/桁高		11.4464
主塔形状		H型
ケーブル		ファン型 (2面13段)

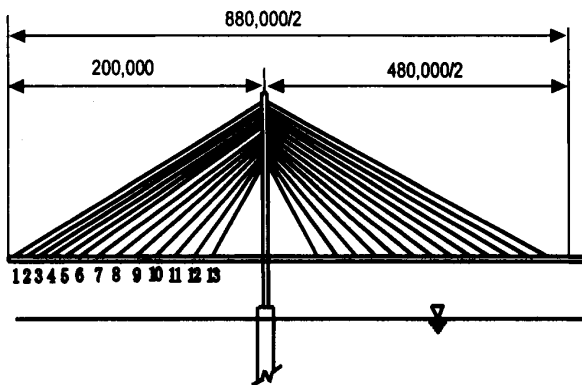


(b) 主桁断面図



(c) 主塔断面図

図-2 女神大橋の一般図(単位: mm)



(a) 側面図

4. 計算モデルの妥当性の検討

本研究では、ケーブル振動が斜張橋の全体振動に及ぼす影響を無視して斜張橋全体系の固有振動解析を行っている。また、ケーブルの局部振動数を求めるにあたっては、ケーブルの支点をピンとして解析している。ケーブルの局部振動の解析が通常FEM解析では無理であるため、このような取り扱いをしている。この方法の妥当性を検討するために、ケーブルを分割しての質点を考慮した斜張橋全体系の固有振動解析を行う。これによって、斜張橋全体系とケーブルの局部振動の固有振動数を同時に求めることができる。

表-2にケーブル振動を無視する場合およびケーブル振動を考慮する場合の斜張橋全体系の固有振動数を示す。表に示すように、鉛直振動についてはケーブル振動を無視する場合を基準とした両者の差が1%以下で一致しており、ケーブル振動が全体振動に及ぼす影響は無視できる。しかし、面外振動においては両者の差が約3%になる。このように、面外振動の場合にはケーブル振動が全体振動に及ぼす影響が現れるが、その影響は小さい。

表-2 斜張橋全体系の固有振動数

モード特性	振動数(Hz)		差 (%)
	ケーブル 0分割	ケーブル 10分割	
鉛直1次	0.255	0.256	0.39
鉛直2次	0.367	0.368	0.27
鉛直3次	0.526	0.523	-0.57
鉛直4次	0.647	0.652	0.77
鉛直5次	0.726	—	
鉛直6次	0.851	—	
鉛直7次	1.005	—	
面外1次	0.460	0.445	-3.26

—: 100次モード以上であるため、出力できない

次に、両端ピンで支持される単一ケーブルとしての固有振動数の解析解と、ケーブル振動を考慮したFEM解析により得られたケーブルの局部振動の固有振動数を表-3に示す。表より解析解を基準とした両者の差は2%前後であるが、さらに分割数を多くすれば、この差は小さいことが確認されている。ピンで支持される単一ケーブルの取り扱いの妥当性が確認される。

表-3 ケーブルの固有振動数

ケーブル 番号	振動数 (Hz)		差 (%)
	解析解	FEM解析 10分割	
C1	0.502	0.500	-0.40
C2	0.548	0.558	1.82
C3	0.585	0.595	1.71
C4	0.633	0.646	2.05
C5	0.648	0.661	2.01
C6	0.635	0.646	1.73
C7	0.688	—	
C8	0.796	—	

C9	0.909	—	
C10	1.016	—	
C11	1.157	—	
C12	1.368	—	
C13	1.628	—	
C14	1.636	—	
C15	1.375	—	
C16	1.162	—	
C17	1.020	—	
C18	0.860	—	
C19	0.732	—	
C20	0.653	0.665	1.86
C21	0.576	0.585	1.56
C22	0.546	0.555	1.65
C23	0.534	0.543	1.69
C24	0.547	0.555	1.46
C25	0.529	0.537	1.51
C26	0.492	0.493	0.20

—: 100次モード以上であるため、出力できない

5. 斜張橋全体系の固有振動数とケーブルの局部振動の固有振動数の関係

斜張橋全体系の鉛直振動およびねじれ振動によって、斜張橋全体系の固有振動数とケーブルの局部振動の固有振動数との関係から、ケーブルに副不安定領域（斜張橋全体系の固有振動数がケーブルの局部振動の固有振動数と一致）および主不安定領域（斜張橋全体系の固有振動数がケーブルの局部振動の固有振動数の2倍と一致）において係数励振振動が発生する可能性がある。したがって、両者の関係について検討し、係数励振振動が発生する可能性があるケーブルを選び出す。

図-3に斜張橋全体系の固有振動数とケーブルの局部振動の固有振動数の関係を示す。図-3より斜張橋全体系の振動によって、係数励振振動が発生するケーブルを選ぶと表-4の結果を得る。

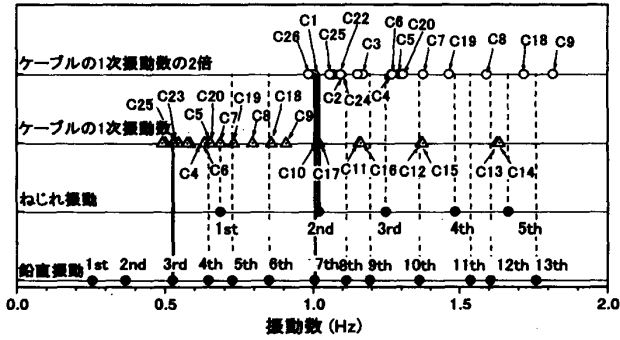
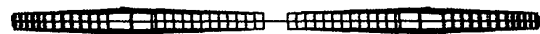


図-3 斜張橋全体系の固有振動数とケーブルの局所振動の固有振動数の関係

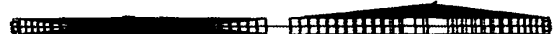
表-4 係数励振振動が発生する可能性があるケーブル

全体系の振動	副不安定領域	主不安定領域
鉛直3次振動(対称)	C23, C25	
鉛直4次振動(逆対称)	C5, C6, C20	
鉛直5次振動(対称)	C19	
鉛直6次振動(逆対称)	C18	
鉛直7次振動(対称)	C10, C17	C1
ねじれ1次振動(対称)	C7, C19, C20	
ねじれ2次振動(逆対称)	C10, C17	C1

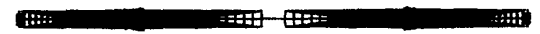
図-4に係数励振振動を発生させる可能性がある全体系の鉛直振動とねじれ振動の固有振動数と固有振動モードを示す。



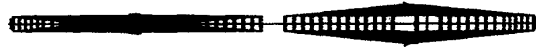
(a) 鉛直3次振動(対称) (f = 0.526Hz)



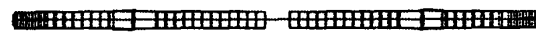
(b) 鉛直4次振動(逆対称) (f = 0.647Hz)



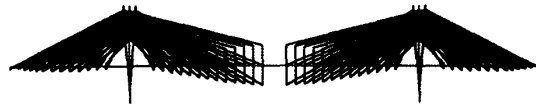
(c) 鉛直5次振動(対称) (f = 0.726Hz)



(d) 鉛直6次振動(逆対称) (f = 0.851Hz)



(e) 鉛直7次振動(対称) (f = 1.005Hz)



(f) ねじれ1次振動(対称) (f = 0.686Hz)



(g) ねじれ2次振動(逆対称) (f = 1.019Hz)

図-4 固有振動モード

6. 鉛直正弦波加振によるケーブルの局所振動特性

斜張橋全体系の鉛直振動によるケーブルの局所振動応答を明らかにする。斜張橋に対し鉛直3次から7次までの固有振動数で鉛直正弦波加振する場合の定着点の主桁および主塔の応答を求める。次いでケーブルの係数励振振動の解析を行う。加振力の振幅は $5tf$ とし、作用点是对称振動は $1/2$ 、逆対称振動は $1/4$ とする。女神大橋(鋼斜張橋)全体の減衰定数は 0.02 、ケーブルの減衰定数は 0.001 と仮定する。

図-5~9に鉛直3次振動固有振動数から7次振動固有振動数と同じ加振振動数をもつ鉛直正弦波加振による各ケーブルの最大振幅を示す。図-5~9に示すように、ケーブルC5, C6, C10, C17, C18, C19, C20, C23およびC25の応答が卓越している。図-10にこれらの図において最もケーブルの応答が大きい鉛直正弦

波加振による女神大橋のケーブルC25とその定着点の主桁の応答と応答スペクトルを示す。ケーブルC25の1次固有振動数が鉛直3次固有振動数(0.526Hz)に接近しているため、図-10に示すように、ケーブルC17に副不安定領域における係数励振振動が発生している。

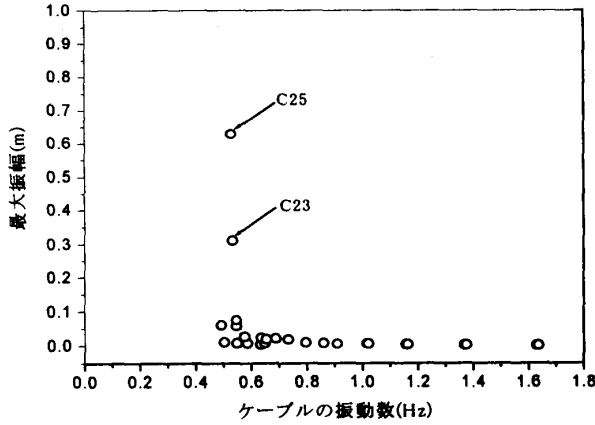


図-5 鉛直3次振動加振によるケーブルの最大振幅
(加振振動数 $f = 0.526\text{Hz}$, 加振力 = 5 tf)

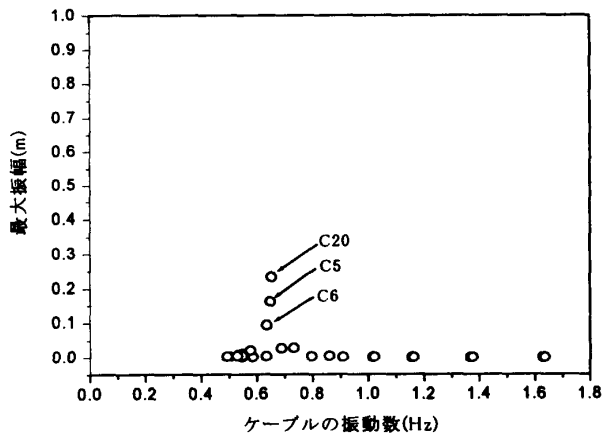


図-6 鉛直4次振動加振によるケーブルの最大振幅
(加振振動数 $f = 0.647\text{Hz}$, 加振力 = 5 tf)

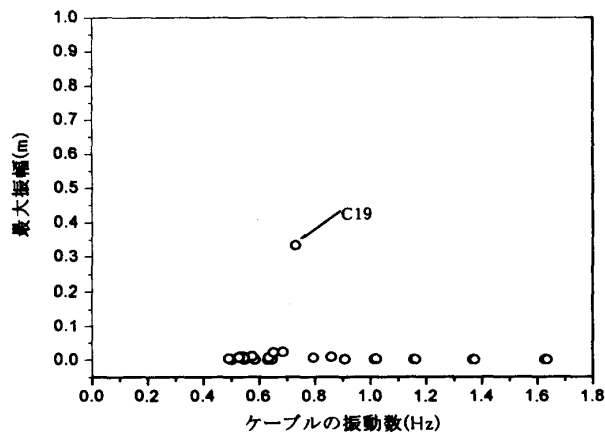


図-7 鉛直5次振動加振によるケーブルの最大振幅
(加振振動数 $f = 0.726\text{Hz}$, 加振力 = 5 tf)

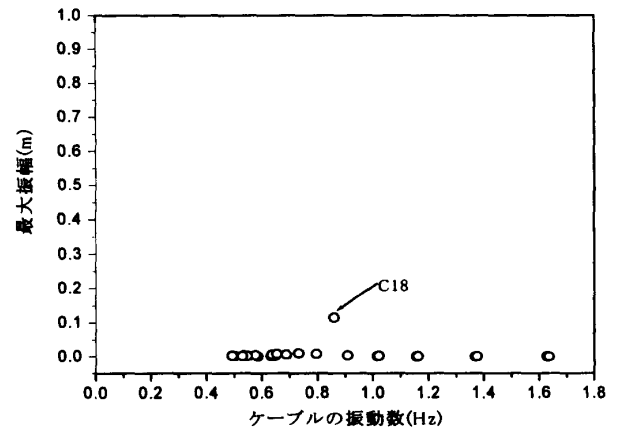


図-8 鉛直6次振動加振によるケーブルの最大振幅
(加振振動数 $f = 0.851\text{Hz}$, 加振力 = 5 tf)

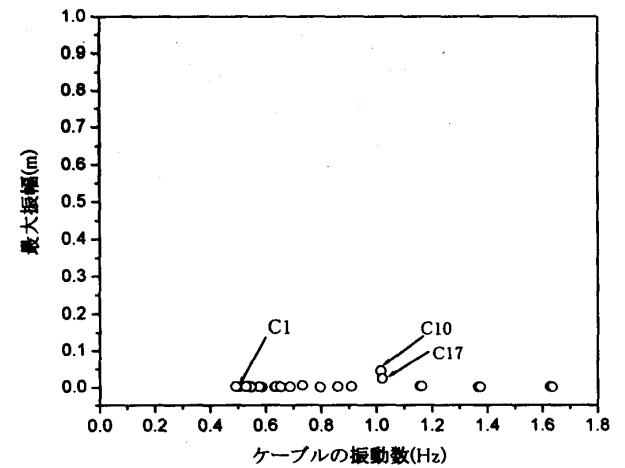
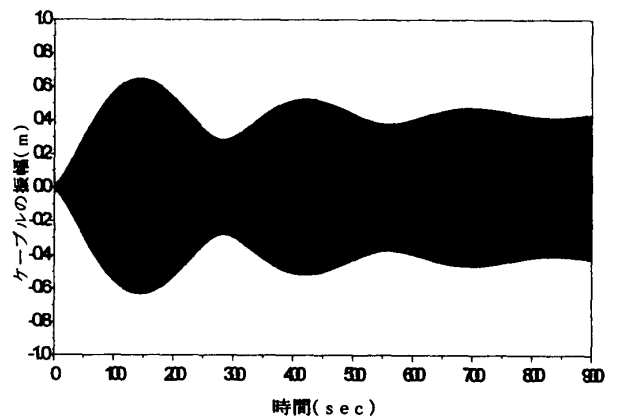
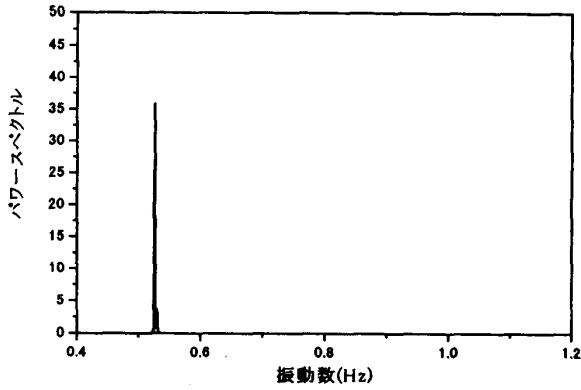


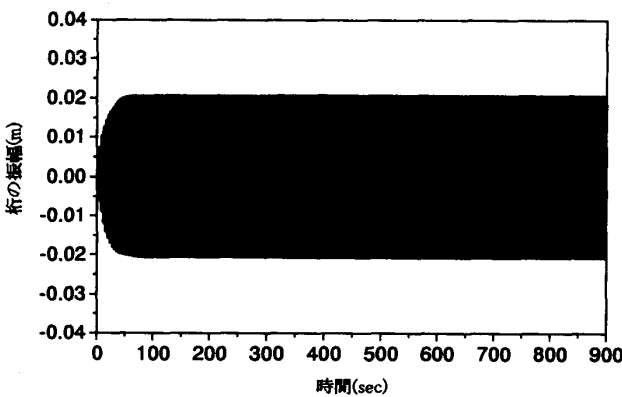
図-9 鉛直7次振動加振によるケーブルの最大振幅
(加振振動数 $f = 1.005\text{Hz}$, 加振力 = 5 tf)



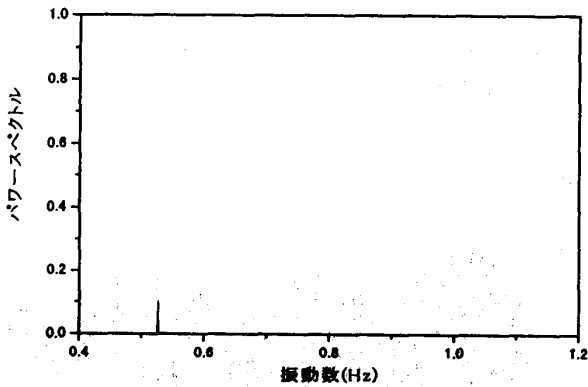
(a) 係数励振振動のケーブルC25の応答



(b) 係数励振振動のケーブルC25の応答スペクトル



(c) ケーブルC25の定着点の主桁の応答



(d) ケーブルC25の定着点の主桁の応答スペクトル

図-10 鉛直 3 次振動加振によるケーブルC25とその定着点の主桁の応答と応答スペクトル

鉛直 7 次振動の固有振動数で加振した場合にケーブル C1 に主不安定領域における係数励振振動が発生する可能性があるが、図-9 を見るとケーブル C1 に係数励振振動が発生していない。この原因は図-11 に示すようにケーブル C1 の定着点における主桁の応答が小さいためである。

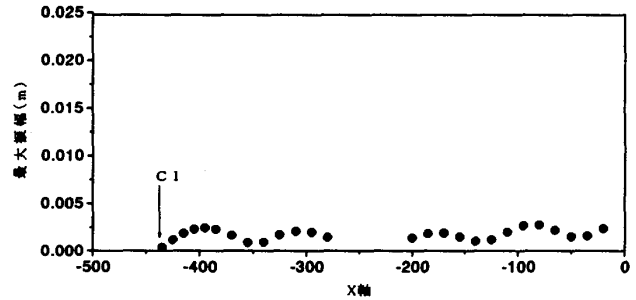


図-11 鉛直 7 次振動加振による女神大橋の定着点の主桁の最大応答

(加振振動数 $f = 1.005\text{Hz}$, 加振力 = 5 tf)

7. ねじれ正弦波加振によるケーブルの局部振動特性

斜張橋全体系のねじれ振動によるケーブルの局部振動特性を明らかにする。ねじれ 1 次および 2 次固有振動数でねじれ正弦波加振する場合の定着点の主桁の応答とケーブルの応答を求める。加振力の振幅は $80\text{tf}\cdot\text{m}$ とし、作用点はねじれ 1 次振動は中央点の両側加振、ねじれ 2 次振動は 1/4 点の両側加振とする。

図-12 および 13 にねじれ正弦波加振による各ケーブルの最大振幅を示す。図-12 および 13 に示すように、ケーブル C7, C10, C17, C19 および C20 の応答が卓越している。図-14 にねじれ正弦波加振による女神大橋のケーブル C7 とその定着点の主桁の応答と応答スペクトルを示す。ケーブル C7 の 1 次固有振動数がねじれ 1 次固有振動数 (0.686Hz) に接近しているため、図-14 に示すように、ケーブル C10 に副不安定領域における係数励振振動が発生している。

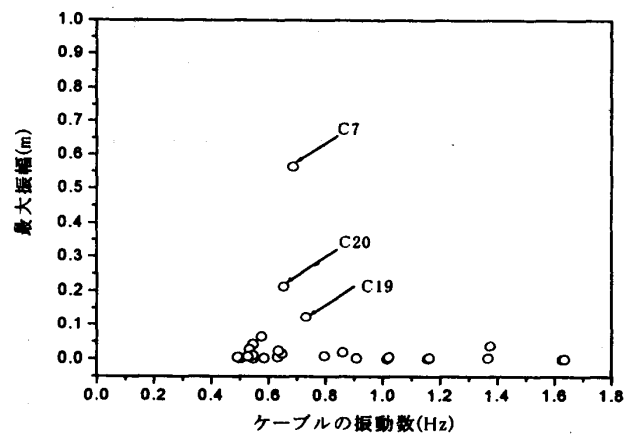


図-12 ねじれ 1 次振動加振によるケーブルの最大振幅 (加振振動数 $f = 0.686\text{Hz}$, 加振力 = $80\text{tf}\cdot\text{m}$)

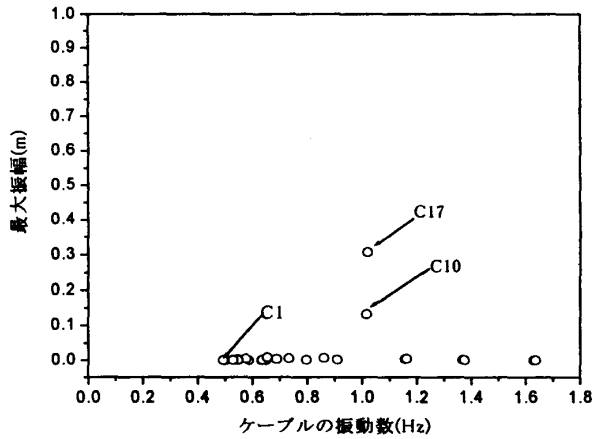
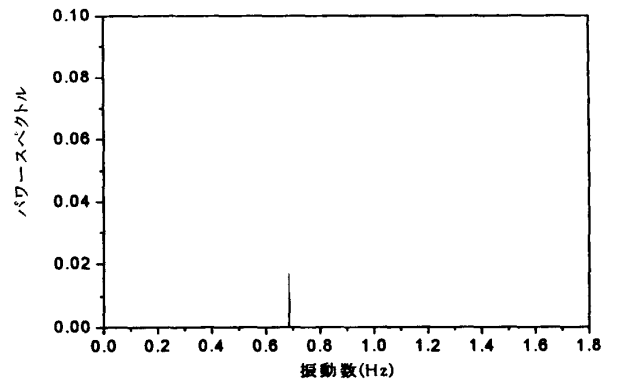
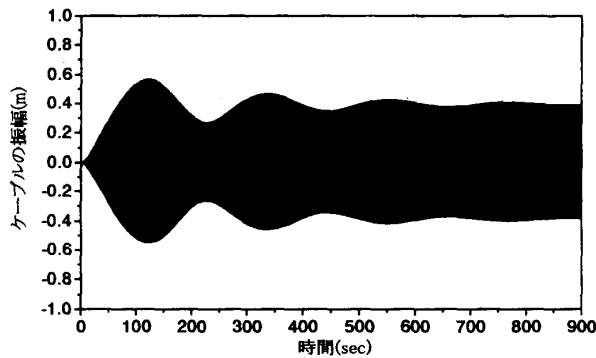


図-13 ねじれ2次振動加振によるケーブルの最大振幅
(加振振動数 $f = 1.019\text{Hz}$, 加振力 $= 80\text{tf}\cdot\text{m}$)

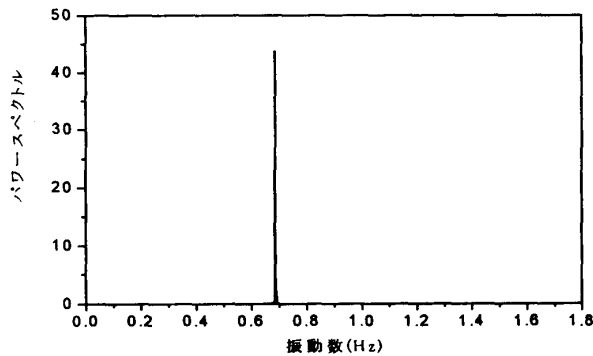


(d) ケーブルC7の定着点の主桁の応答スペクトル

図-14 ねじれ1次振動加振によるケーブルC7とその定着点の主桁の応答と応答スペクトル



(a) 係数励振振動のケーブルC7の応答



(b) 係数励振振動のケーブルC7の応答スペクトル

ケーブルC1に主不安定領域における係数励振振動が発生する可能性があるが、図-13を見るとケーブルC1に係数励振振動が発生していない。この原因は図-15に示すようにケーブルC15の定着点における主桁の応答が小さいためである。

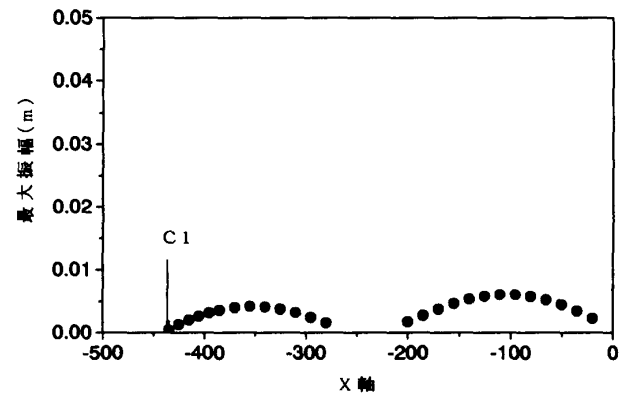
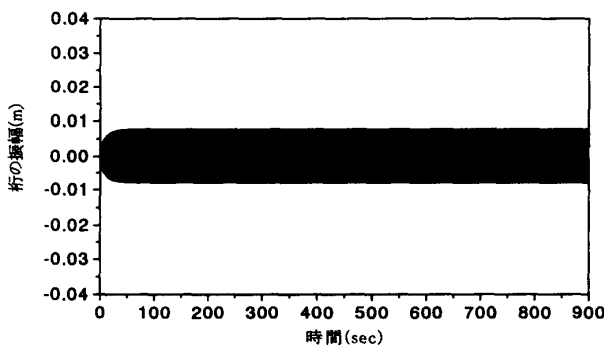


図-15 ねじれ2次振動加振による女神大橋の定着点の主桁の最大応答

(加振振動数 $f = 1.019\text{Hz}$, 加振力 $= 80\text{tf}\cdot\text{m}$)



(c) ケーブルC7の定着点の主桁の応答

8. まとめ

本論文では女神大橋（仮称）を解析対象とし、斜張橋全体系の鉛直振動やねじれ振動によって、支持ケーブルに副不安定領域および主不安定領域の係数励振振動を受ける特性を明らかにした。解析によって得られた結論を以下に示す。

- (1) ケーブル振動が斜張橋全体系の固有振動に与える影響は鉛直方向の振動に対しては無視してもよい。面外方向の振動に対しては影響が現れるが、その大きさは小さい。また、ケーブルの固有振動数はピンで支持される単一ケーブルで扱う取り扱いで十分である。
- (2) 斜張橋全体系の固有振動数とケーブルの局部振動

の固有振動数の関係から、ケーブルに副不安定領域および主不安定領域において係数励振振動が発生する可能性があることを明らかにした。

- (3) 鉛直正弦波加振およびねじれ正弦波加振により、ケーブルに副不安定領域における係数励振振動が発生することが確認された。

謝 辞

本研究を行うにあたって、女神大橋の資料を提供頂いた長崎県女神大橋建設事務所に謝意を表す。

参考文献

- 1) Technical Committee on Cables structures and Wind, Japan Association for Wind Engineer, Proceedings of International Seminar on Cable Dynamics, pp.1-11, 1997.10
- 2) 岡内, 宮田, 辰巳, 佐々木: 大振幅加振による長

大斜張橋の実橋実験, 土木学会論文集, 第455号, pp.75-84, 1992.10.

- 3) 藤野, 岩本, 加藤, 岡林, 本田, 平本, 志水, 飯村: 木製斜張橋(用倉大橋)の振動実験, 土木学会第48回次学術講演会講演概要集, 第I部, pp.752-753, 1993.9.
- 4) 真辺, 佐々木, 山口: 多々羅大橋の実橋振動実験, 橋梁と基礎, Vol.33, pp.27-30, 1999.5.
- 5) 高橋, 呉, 中村, 久保田, 伊田: 斜張橋の支持ケーブルの局部振動の解析, 構造工学論文集, Vol.46 A, pp.501-510, 2000.3.
- 6) 呉, 高橋, 中村, 岡林: 実斜張橋の支持ケーブルの局部振動特性, 鋼構造年次論文報告集, Vol.8, pp.557-564, 2000.
- 7) 呉, 高橋, 岡林, 中村: 天建寺PC斜張橋のケーブルの局部振動解析, 長崎大学工学部研究報告, 第31巻, 第56号, pp.87-93, 2001.6.