

天建寺PC斜張橋のケーブルの局部振動解析

呉 庆雄*・高橋 和雄**・岡林 隆敏**・中村 聖三**

Response Characteristics on Local Vibrations of Stay Cables in Tenkenji PC Cable-stayed Bridge

by

Qingxiong WU*, Kazuo TAKAHASHI**, Takatoshi OKABAYASHI** and Shozo NAKAMURA**

Local parametric vibrations of stay cables in Tenkenji PC 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 global motions under the excitation using the exciter, traffic loading and earthquakes 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

風荷重や車の走行荷重による斜張橋全体系の振動によって、支持ケーブル（以下ケーブルと略記する）に振幅の大きな局部振動が発生することが指摘されている。

高橋ら³⁾は日本に建設された斜張橋を対象とした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明らかにするとともに、ケーブルに係数励振振動の発生可能な振動数範囲およびケーブル応答特性を明らかにした。しかし、ケーブルの係数励振振動による局部振動の応答を求めるにあたって、ケーブルに一定の大きさの周期的支点移動を与えた場合を対象としている。斜張橋の桁や塔に作用する荷重による動的な応答に基づいた支点移動を受けるケーブルの局部振動を評価したものではない。

この点を明らかにするため、呉ら³⁾は実鋼斜張橋である大島大橋（長崎県）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による斜張橋の応答により支持ケーブルに発生する係数励振振動による局部振動の応答特性を明らかにした。

さらに、本論文では、実PC斜張橋である天建寺橋（佐賀県）を対象として、正弦波加振、走行荷重および地震力による局部振動の応答特性を明らかにする。さらに、ケーブルの係数励振振動による鋼斜張橋とPC斜張橋振動により支持ケーブルに発生する局部振動の特

性を比較する。

2. 解析方法

斜張橋全体系の応答解析では、まず、斜張橋の3次元モデルを用いて固有振動数と固有振動形を求める。次いで、モード解析法によって動的な外力が作用した場合の斜張橋全体系の応答解析を行う。これより動的な外力が作用する場合のケーブルを含めた斜張橋の応答が明らかにされる。しかし、ケーブルの係数励振振動による応答は全体系の応答解析では評価できない。係数励振振動の影響を考慮した取扱いによって、別途支点変位を受けるケーブルの振動モデルを用いた解析を行う。なお、本論文では、ケーブルの局部振動が全体系の振動に影響を及ぼさないと仮定する。詳細は文献3)に示すとおりである。

3. 斜張橋の全体振動とケーブルの局部振動

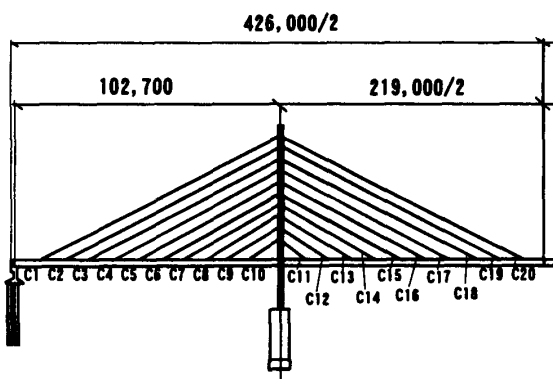
(1) 解析モデル

本論文で対象としたPC斜張橋は平成11年3月に開通した天建寺橋（佐賀市）である。天建寺橋の主橋梁は3径間連続PC斜張橋で、橋長は426.0m (102.7m+219.0m+102.7m)である。主塔はH型であり、ケーブルの張り方は準ハープ形2面吊りである。一般図は図-1に示すとおりである。ケーブルの番号は図-1のように側径間から主径間に向かって順番に付ける。

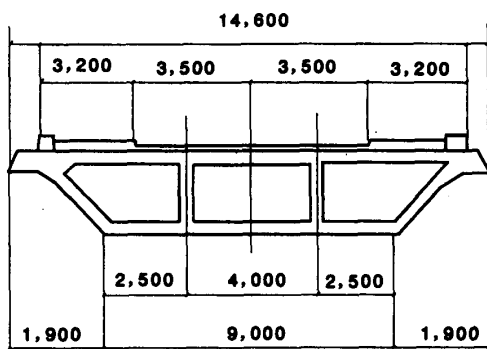
平成12年10月27日受理

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

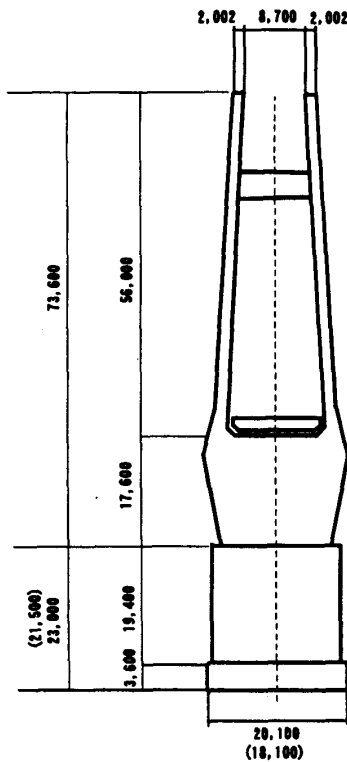
**工学部社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)



側面図



主桁断面図



主塔断面図

図-1 天建寺橋の一般図 (単位: mm)



鉛直対称 1 次振動 (f=0.383Hz)



鉛直逆対称 1 次振動 (f=0.611Hz)



鉛直対称 2 次振動 (f=0.839Hz)



ねじれ対称 1 次振動 (f=2.206Hz)

図-2 固有振動モード

(2) 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

2章で示した方法によって斜張橋の全体振動計算を行い、全体振動の鉛直とねじれ振動の固有振動モードを図-3と図-4に示す。ケーブルの固有振動数の計算にはサグの影響を考慮した式を用いる。本論文では半分のケーブルを計算する。

図-3は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を示している。

天建寺橋のケーブルについては、1次固有振動数(副不安定領域に対応)と1次固有振動数の2倍(主不安定領域に対応)を示す。図より、鉛直対称2次固有振動数がケーブルC20の1次固有振動数に、鉛直逆対称2次固有振動数がケーブルC2およびC18の1次固有振動数に、鉛直対称3次固有振動数がケーブルC4の1次固有振動数に、さらに鉛直逆対称3次固有振動数がケーブルC6の1次固有振動数にそれぞれ接近し、副不安定領域に対応している。全体系のねじれ対称1次固有振動数がケーブルC3の固有振動数の2倍に接近し、主不安定領域に対応している。

4. 正弦波加振によるケーブルの局部振動特性

起振機実験を想定して斜張橋を正弦波加振する場合の応答を求める。ケーブルには、3章に示したように、鉛直振動によって副不安定領域に、さらにねじれ振動によって主不安定領域に、係数励振振動が発生する可能性がある。鉛直正弦波加振、およびねじれ正弦波加振を行う。なお、PC斜張橋の減衰定数は0.03と仮定する。また、ケーブルの減衰定数は0.001と仮定する。

(1) 鉛直正弦波加振

鉛直正弦波加振は、全体鉛直対称2次固有振動数と

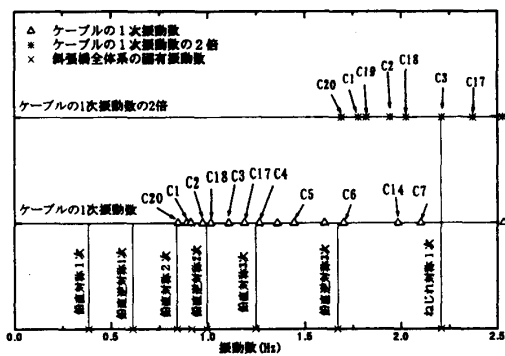


図-3 全体系の固有振動数とケーブルの固有振動数の関係図

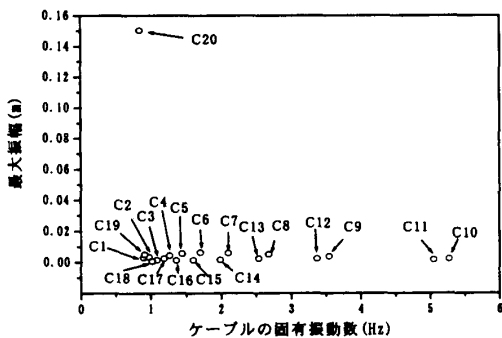


図-4 鉛直正弦波加振によるケーブルの最大振幅(加振振動数 $f=0.839\text{Hz}$ 、加振力 $=20tf$)

同一の加振振動数 0.839Hz および加振力の振幅 $20tf$ で行い、作用点を中央スパンの中央点とする。

図-4は各ケーブルの最大振幅を示す。図より、全体振動の鉛直対称2次固有振動数とケーブルC20の1次固有振動数が接近しているため、ケーブルC20の振幅が大きい。

図-5はケーブルC20の定着点の主桁の応答とケーブルC20の応答とスペクトルを示す。

参考のため、ケーブルC20の強制振動時の応答を示している。副不安定領域の応答であるため、斜張橋の主桁とケーブルの振動数の比はスペクトルに示すように1である。

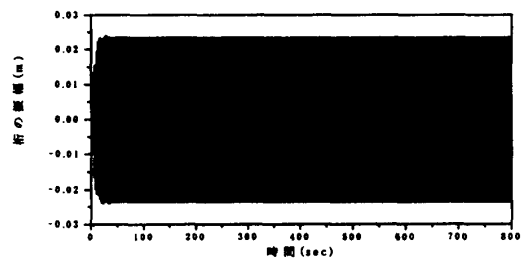
ケーブルC20の係数励振振動と強制振動の応答を比較すると、ケーブル係数励振振動を考慮した場合のC20の振幅は強制振動の場合と同じ程度である。また、係数励振振動の応答はうなりを伴っている。

大島大橋鋼斜張橋においても、全体低次鉛直振動数とケーブルの固有振動数の比が1の副不安定領域の係数励振振動が発生している³⁾。

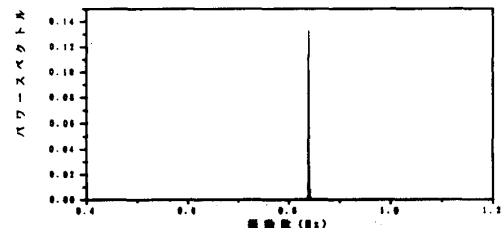
(2) ねじれ正弦波加振

ねじれ正弦波加振には、全体ねじれ対称1次固有振動数と同一の加振振動数 2.206Hz で、中央スパンの中央点の両側に起振機を2台設置して逆位相の加振を行う。

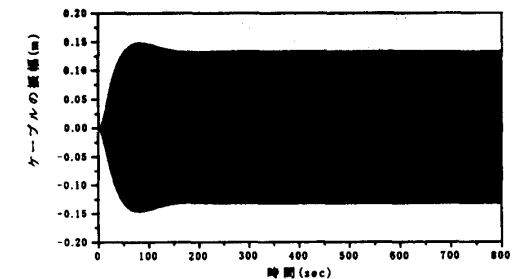
図-6はねじれ正弦波加振による各ケーブルの最大振



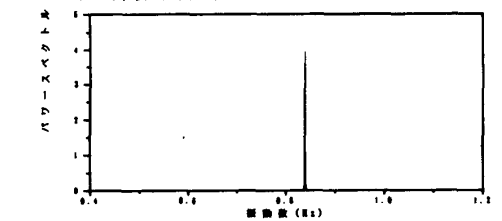
(a) 定着点における主桁の応答



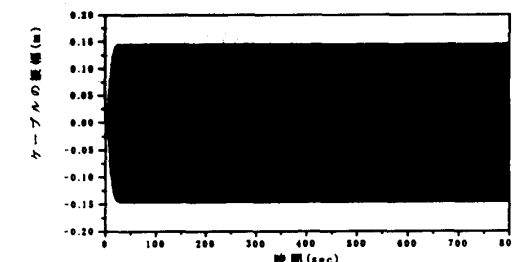
(b) 定着点における主桁の応答スペクトル



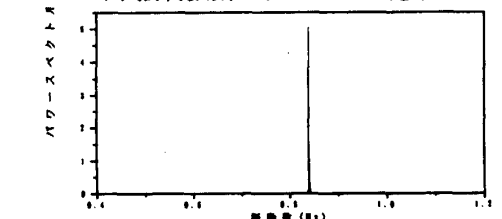
(c) 係数励振振動のケーブルの応答



(d) 係数励振振動のケーブルの応答スペクトル



(e) 強制振動のケーブルの応答



(f) 強制振動のケーブルの応答スペクトル

図-5 鉛直正弦波加振によるケーブルC20の定着点の主桁とケーブルC20の応答

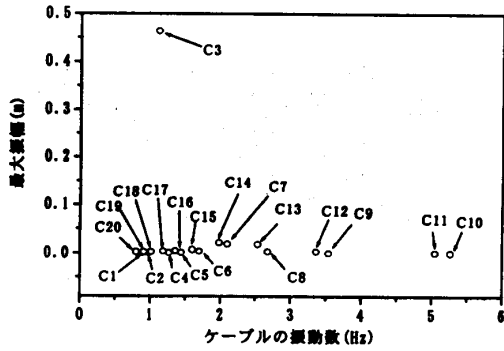
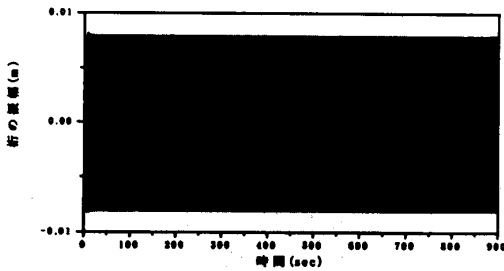
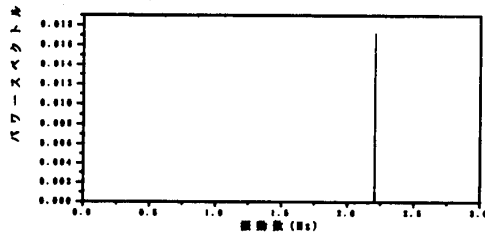


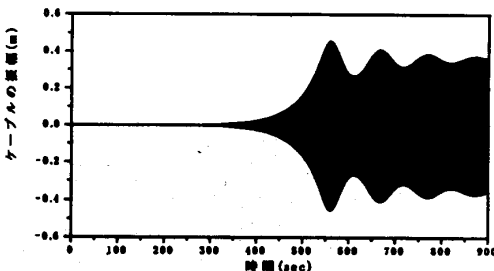
図-6 ねじれ正弦波加振によるケーブルの最大振幅(加振振動数 $f=2.206\text{Hz}$, 加振力 $=20tf$)



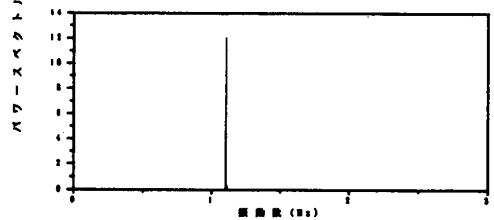
(a) 定着点における主桁の応答



(b) 定着点における主桁の応答スペクトル



(c) ケーブルの応答



(d) ケーブルの応答スペクトル

図-7 ねじれ正弦波によるケーブル C3 の定着点の主桁とケーブル C3 の応答

幅である。図-6より、ケーブルC3の応答が大きい。

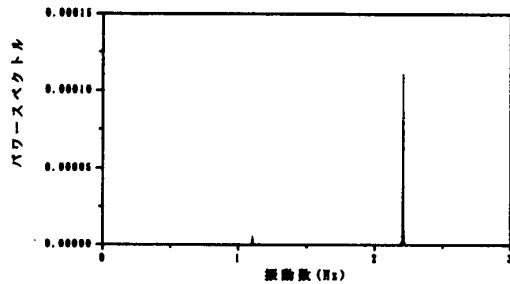
図-7はケーブルC3の定着点の主桁の応答とケーブル

C3の応答を示す。図-6より、主桁の変位 (0.007m) が定常に振動し始めてから、約5分後ケーブルに大きな振動が発生した。最大振幅は、0.464mに達し、主桁の変位の600倍の程度になる。

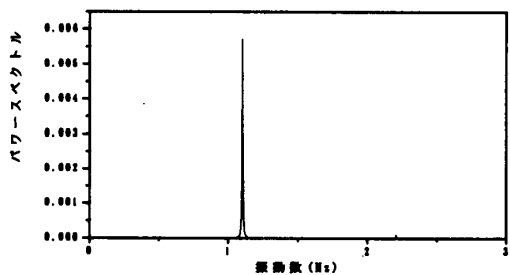
図-6より、全体振動のねじれ対称1次固有振動数 (2.206Hz) とケーブルC3の1次振動数 (1.105Hz) の比は約2であるので、ケーブルC3に主不安定領域における係数励振振動が発生している。

図-8は0秒~200秒、200秒~400秒および400秒~960秒におけるケーブルC3の応答スペクトルである。図より、0秒~200秒ではケーブルと主桁が同じの振動数で強制振動している。200秒~400秒にケーブルと主桁が同じ振動数をもつ強制振動からケーブルの固有振動に変わる。もちろん、400秒からケーブルに急に大きな振幅が現れる領域の卓越振動数はケーブルの固有振動数である。

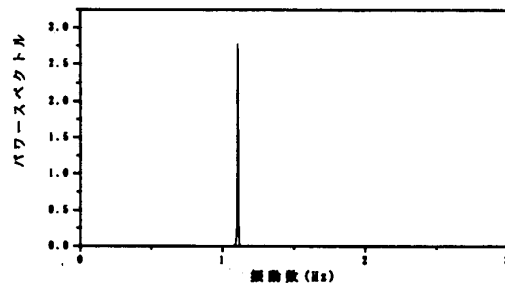
多々羅大橋⁴⁾の振動実験によれば、ねじれ逆対称1次振動加振時に、加振開始後約15分間程度で、主桁が定常振幅をキープしていたところ、突然あるケーブルに



(a) 時間 0~200 秒



(b) 時間 200~400 秒



(c) 時間 400~960 秒

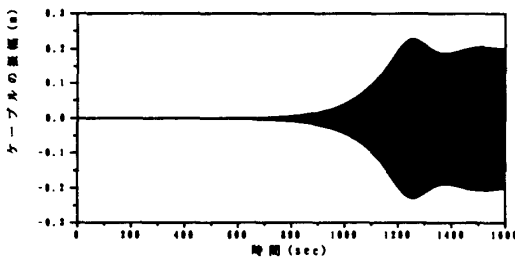
図-8 ケーブル C3 の応答スペクトル

加振振動数の1/2の振動数をもつ主不安定領域の振動が発生している。本論文に示している結果は多々羅大橋などの係数励振振動の発生と同じ傾向を示している。

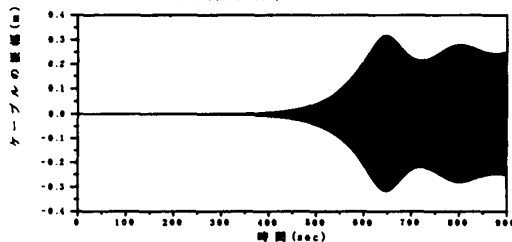
さらに、加振力の大きさの影響を調べるために、加振力を10tfから30tfまで変化させた場合のケーブルの応答を表-1に示す。加振力の変化に伴うケーブルが主不安定領域に定常振動の発生を図-6と図-9に示している。表-1により、加振力の増大とともに、発達時間が早くなる。つまり、加振力の増大によってケーブルの定常振動の発生が早くなる。つまり、加振力の増大によってケーブルの定常振動の発生が早くなる。つまり、加振力の増大によってケーブルの定常振動の発生が早くなる。

表-1 加振力とケーブル C3 の応答との関係

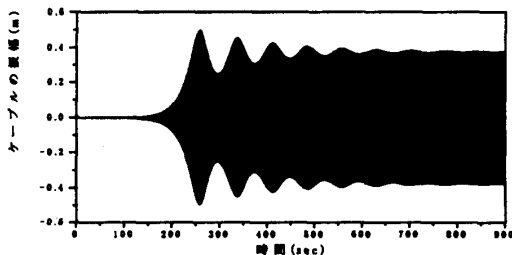
| 起振力 (tf) | 相当起振ねじれモーメント (tf・m) | ケーブルの定着点の桁の最大振幅 (m) | ケーブルの最大振幅 (m) | 最大振幅に達する時間 (sec) |
|----------|---------------------|---------------------|---------------|------------------|
| 10 | 133 | 0.004 | 0.231 | 1255.5 |
| 15 | 200 | 0.006 | 0.322 | 646.2 |
| 20 | 266 | 0.007 | 0.464 | 559.2 |
| 30 | 399 | 0.012 | 0.505 | 258.2 |



(a) 加振力 10tf



(b) 加振力 15tf



(c) 加振力 30tf

図-9 ケーブル C3 の主不安定領域の応答に及ぼす加振力の影響

振動の発達時間が早くなる。

文献3)では主不安定領域の振幅は発達時間を必要としていない。これに対して、多々羅大橋では発達時間を要し、両者の現象に差があった。この原因は加振振幅の大きさによるものであることが判明した。すなわち、ねじれ振動のように主桁の振幅が小さい場合には、係数励振振動の発生に時間を要するといえる。

5. 走行荷重によるケーブルの局部振動特性

(1) 橋梁-車両-路面系のモデル化

本章では、走行荷重が作用した場合の斜張橋の応答によるケーブルの係数励振振動を調べる。

本論文では、PC斜張橋の減衰定数を0.03とし、車両のパラメーターを表-2に示す。路面凹凸については路面上のパワースペクトル密度 $S_r(\omega)=S_0/(\omega^2+\beta^2)$ として、路面状態が最良の場合を用いる。

表-2 1自由度系車両の諸元

| | | |
|------|------------|------|
| 重量 | w (tf) | 20 |
| 振動数 | f_0 (Hz) | 2.60 |
| 減衰定数 | h_0 | 0.03 |

(2) 車両荷重によるケーブルの局部振動

橋梁-車両-路面系モデルを用いて計算して得られるケーブル定着点の主桁変位をケーブルの支点変位として、ケーブルの非線形運動方程式 (4) により、ケーブルの局部振動解析を行う。なお、車両は $V=30\text{km/h}$ で走行する場合について計算する。

ケーブルの最大振幅を求めると図-10に示す結果が得られる。図-10に示すように、ケーブルC13およびC7、C8の振幅が卓越している。ケーブルC13およびC7、C8については、これらの固有振動数が主桁の卓越振動数に一致しているので、ケーブルC13について検討する。

ケーブルC13の固有振動数は2.531Hzである。図-11にケーブルC13の定着点の主桁の応答とケーブルC13の応答を示す。主桁の応答に注目すると、車両の固有振動数2.70Hz付近の振動数が卓越している。一方、ケーブルC13は固有振動数で振動している。つまり、桁の応答振動数とケーブルの固有振動数の比が約1であることから、ケーブルに副不安定領域の係数励振振動が発生していることが確認できる。ケーブルには主桁の5倍程度の応答が発生している。しかし、走行荷重によるケーブルの局部振動の振幅が小さいため実用上には問題にならないといえる。

大島大橋鋼斜張橋では全体振動数とケーブルの固有振動数の比が2の主不安定領域の係数励振振動が発生し

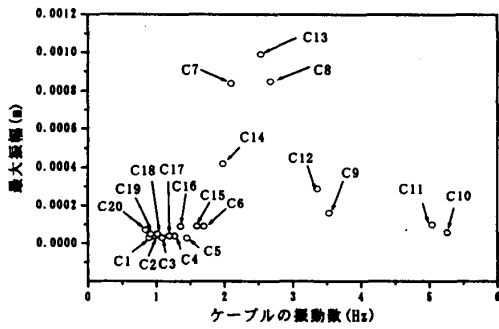


図-10 走行荷重によるケーブルの最大振幅

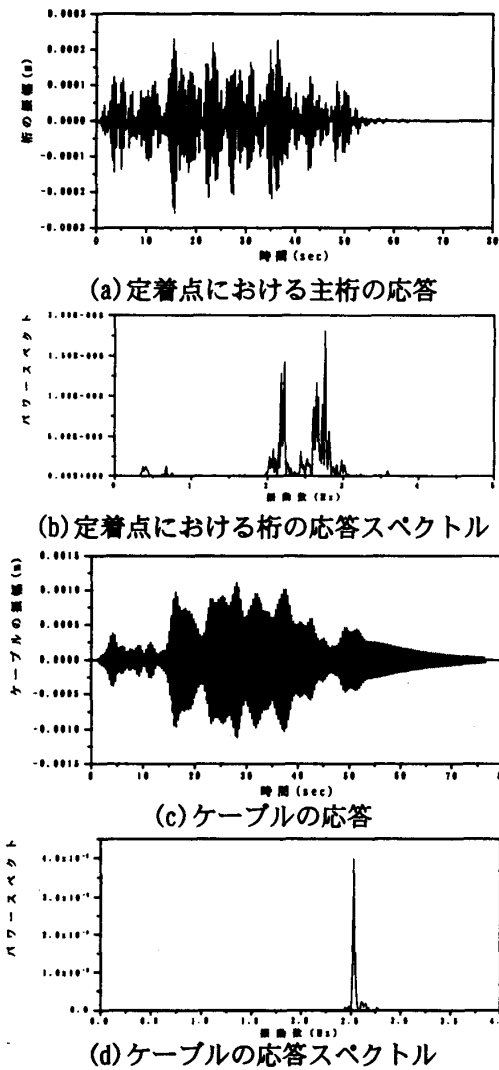


図-11 走行荷重によるケーブル C13 の定着点の主桁とケーブル C13 の応答

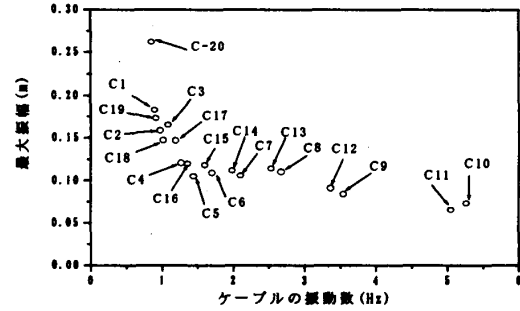


図-12 地震荷重によるケーブルの最大振幅

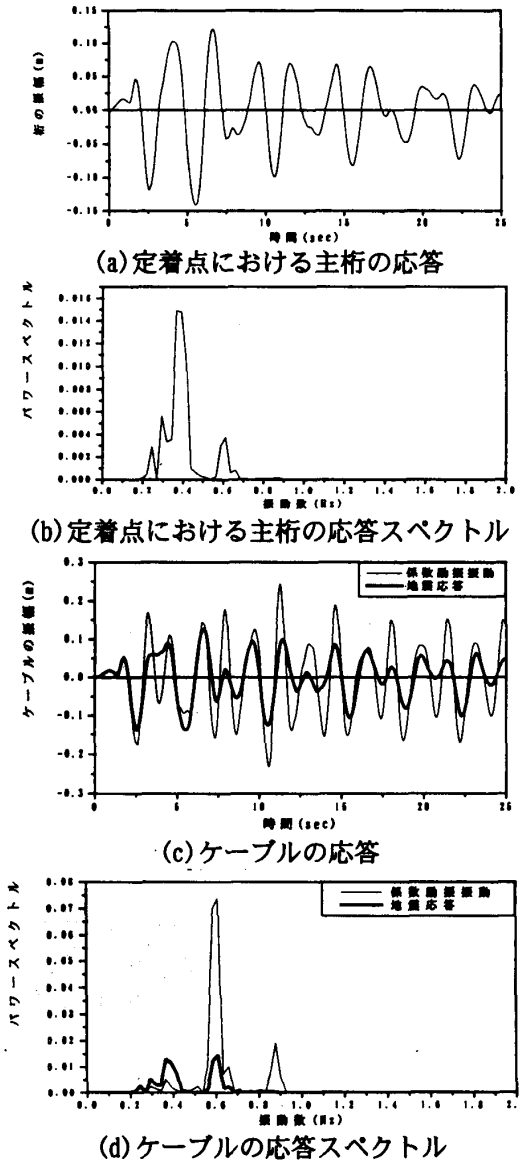


図-13 地震荷重によるケーブル C20 の定着点の主桁とケーブル C20 の応答

ている³⁾。

6. 地震荷重によるケーブルの局所振動特性

本章では、地震が作用した場合の斜張橋の振動に伴うケーブルの係数励振振動の発生を調べる。地震荷重の解析条件のうち入力地震動は平成8年版の道路橋示方

書(耐震設計編)⁶⁾に準じて、レベル I の地盤種別 I 種の地震波形を用いて計算する。地震応答解析にあたって、加速度波形を橋軸方向に作用させ、Newmark の β 法 ($\beta=0.25$) を用い、時間間隔 $\Delta T=0.01\text{sec}$ 、継続時間 $T=25\text{sec}$ として数値解析を行う。

地震荷重による各ケーブルの最大振幅を図-12に示

す。図より、ケーブルの応答に大差がないといえる。図-13に比較的応答が大きいケーブルC20の定着点における主桁の応答とケーブルC20の応答を示す。図に示すように、ケーブルに地震力が作用した地震応答の場合には、ケーブルは全体系の固有振動数で振動するが、係数励振振動を考慮する場合にはケーブルの固有振動が発生していることがわかる。しかし、うなりを伴う係数励振振動は発生していない。

大島大橋鋼斜張橋においても、うなりを伴う係数励振振動は発生していないことから、係数励振振動は発生しないといえる³⁾。

7.まとめ

本論文では、動的外力による実PC斜張橋の全体振動によるケーブルの係数励振振動の特性を明らかにした。本論文によって得られた結果を以下に示す。

- (1) 鉛直正弦波加振で計算したところ、本橋では全体振動数とケーブルの固有振動数の比が1の副不安定領域において、係数励振振動が発生する。係数励振振動はうなりを伴った振動波形をもっている。係数励振振動の振幅は強制振動の振幅と同じ程度である。
- (2) ねじれ正弦波加振によって、本橋では全体振動数とケーブルの固有振動数の比が2の主不安定領域において、大振幅振動となる係数励振振動が発生する。係数励振振動が現れるまでにかなりの時間を要することが判明した。この時間は加振力の大きさに関係する。
- (3) 走行荷重によって、本橋ではケーブルには全体振動数とケーブルの固有振動数の比が1の副不安定領域の係数励振振動が発生する。走行荷重によるケーブルの局部振動の振幅が小さいため実用上には問題にならない。
- (4) 地震による過渡振動の場合、係数励振振動は発生しない。

以上によって、PC斜張橋の全体振動の応答によって、係数励振振動によるケーブルの局部振動特性が評価できた。

謝辞

本研究を行うにあたって、佐賀県鳥栖土木事務所、オリエンタル建設(株)および日本構造橋梁研究所(株)により天建寺橋の資料を提供と活用の許可を頂いたことに感謝する。

参考文献

- 1) Technical Committee on Cable Structures and Wind, and Japan Association for Wind Engineer, Proceedings of International Seminar on Cable Dynamics, pp.1-11,1997.10.
- 2) 高橋、吳、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.46A, pp.501-510, 2000.3.
- 3) 吳、高橋、岡林、中村：実斜張橋の支持ケーブルの局部振動特性，鋼構造年次論文集，第8巻，pp.557-564, 2000.11.
- 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) 岡林：単一走行車両による道路橋の二乗平均応答解析，土木学会論文報告集，第286号，pp.15-27, 1979.6.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，丸善，1996.12.