

(論文)

# ケーブルトラス橋の振動特性

## Dynamic Characteristics of Cable Trussed Bridges



濱崎義弘\*  
Yoshihiro Hamazaki



安田克典\*  
Katsunori Yasuda



森山佳樹\*  
Yoshiki Moriyama



荻野 啓\*\*  
Kei Ogino



岡田 徹\*\*\* (工博)  
Dr. Toru Okada



本家浩一\*\*\* (工博)  
Dr. Koichi Honke

Cable trussed bridges have comparatively slender girders, a king post, and external cables anchored at both ends of the girders. The combination of a post and the cables acts as an elastic support for the girders in the middle of the span. In steep valleys, this type of bridge is more economical to build. This paper describes the dynamic characteristics, aerodynamic stability, seismic stability, and traffic-response of cable trussed bridges.

まえがき = 徳島自動車道の「竹花橋」(写真1)及び「かさこ橋」では、急峻な地形に架設する必要性から、国内の道路橋として初めてケーブルトラス橋が採用された。ケーブルトラス橋は、鋼桁とケーブルによりトラス構造を形成した橋梁形式である。本形式は、支間中央に配置した支柱によって鋼桁を弾性支持することにより鋼桁に作用する曲げモーメントを低減し、鋼重を軽減するもので、経済性の向上を図ることができる。今後、山間部での道路建設にともなう橋梁計画にあたり、橋脚の建設が困難な地理条件の場合には、経済的かつ合理的な複合橋梁として本橋が目されるものと思われる。

本橋梁は新形式のケーブル系橋梁であり道路橋示方書<sup>1)</sup>(以下、道示)を適用できない部分もあるため、力学的な特性について十分に把握しておく必要がある。また、ケーブル系橋梁は桁橋に比べ揺れやすいとされ、橋桁やケーブル自身の振動に対する検討が不可欠とされる。これまで、その静的な構造特性については、FEM解析や実橋載荷試験結果に基づいた報告がなされている<sup>2)~4)</sup>。一方、動的な特性については、断片的な報告がなされている程度である。そこで、本論文ではケーブルトラス

橋の動特性について実橋計測及びFEM解析などにより明らかにし、総括的に報告する。主な動特性として、固有振動特性、風による桁・ケーブルの振動、地震による振動及び車両走行による交通振動特性を対象とした。

### 1. 構造概要

構造一般図を図1に示す。寸法は両橋を併記している。竹花橋は、支間長72.25m、橋長74mの4主桁構造である。また、かさこ橋は、支間長87m、橋長88.75mの箱桁構造である。両橋ともに、支柱と主桁は剛結構造



写真1 竹花橋全景  
Photo 1 General view of the Takehana Bridge

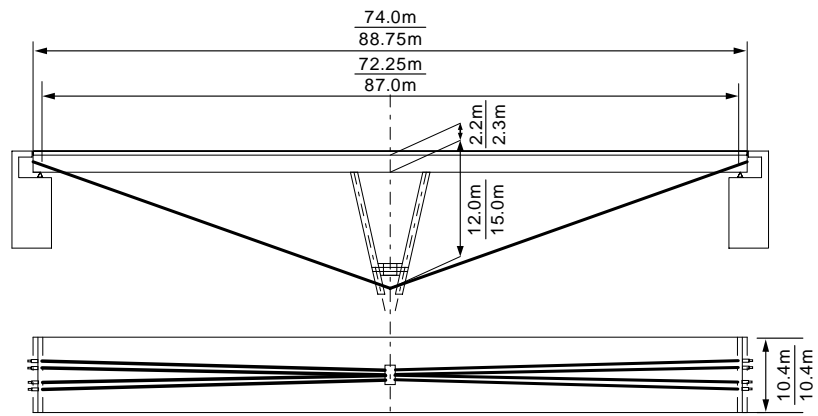


図1 ケーブルトラス橋構造一般図  
(竹花橋)  
(かさこ橋)  
Fig. 1 Structural outline  
(The Takehana Bridge)  
(The Kassako Bridge)

\*都市環境・エンジニアリングカンパニー 構造技術部 \*\*都市環境・エンジニアリングカンパニー 橋梁工場 \*\*\*技術開発本部 機械研究所

表 1 固有振動特性

Table 1 Natural vibration properties

Vibration modes	Takehana Bridge					Kassako Bridge				
	Experiment		Simulation	Design manual		Experiment		Simulation	Design manual	
	Natural freq.(Hz)	Logarithmic damp.	Natural freq.(Hz)	Natural freq.(Hz)	Logarithmic damp.	Natural freq.(Hz)	Logarithmic damp.	Natural freq.(Hz)	Natural freq.(Hz)	Logarithmic damp.
Vertical 1st	1.51	0.066	1.48	1.38	0.088 (Girder) 0.02 (Cable stayed bridge)	1.32	0.047	1.35	1.15	0.088 (Girder) 0.02 (Cable stayed bridge)
Vertical 2nd	4.44	0.104	4.28	-		2.86	0.074	2.86	-	
Vertical 3rd	7.52	0.061	7.27	-		5.18	0.068	5.18	-	
Torsional 1-1	1.51	0.066	1.56	4.15		1.98	0.038	1.98	3.45	
Torsional 1-2	3.05	0.022	3.08	-		2.69	0.026	2.69	-	
Horizontal 1st	-	-	2.98	-		-	-	2.22	-	
Cable 1st	2.95	0.003	2.97	-	-	2.32	0.003	2.32	-	-
Cable 2nd	5.91	0.003	5.94	-	-	4.61	0.003	4.65	-	-
Cable 3rd	8.91	0.004	8.91	-	-	6.96	0.004	6.96	-	-

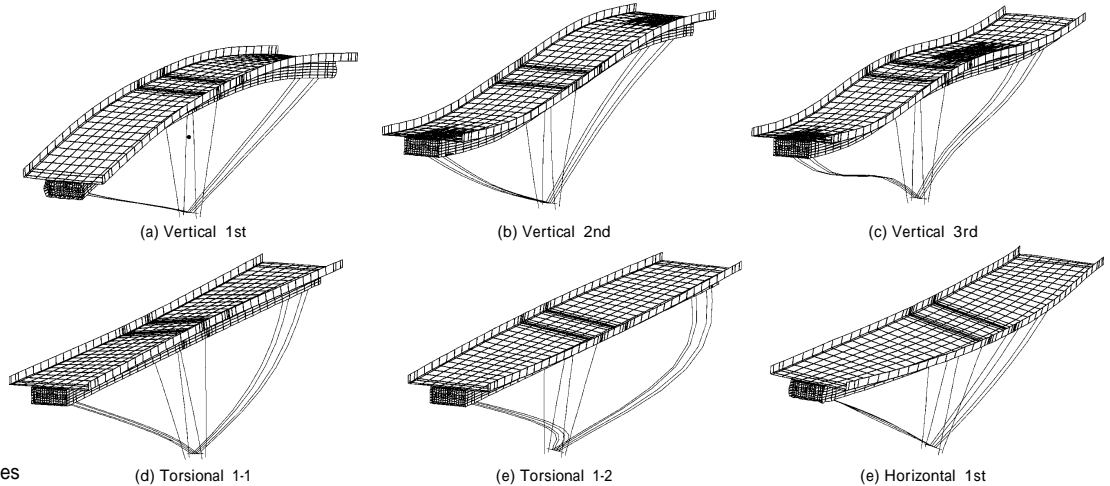


図 2 振動モード  
Fig. 2 Vibration modes

となっている。

## 2. 固有振動特性

竹花橋、かさこ橋の振動試験及び振動解析を行い、両橋の固有振動特性を把握した。その結果を表 1 に、振動モードの例としてかさこ橋の解析結果を図 2 に示す。これらの結果、両橋ともに実測と解析結果は良い対応を示している。また、本橋の特徴として、ねじれ 1 次モードとケーブルモードが連成し、2 つのモードが現れている。ここではそれらのモードをねじれ 1-1 次、ねじれ 1-2 次と表している。なお水平モードは、タイヤ落下加振などの上下方向の加振では励起されにくいので、固有振動数の実測値は把握できていない。

次に、道路橋耐風設計便覧<sup>5)</sup>との比較を行う。設計式による結果を表 1 に併記した。両橋ともに、曲げの固有振動数はほぼ設計式に対応しているが、ねじりの固有振動数は設計式に比べ小さい値となっている。これは、支柱による慣性モーメントの増加と桁のねじり剛性の影響によるものと思われる。また、減衰について同便覧では橋梁形式別の構造減衰が提案されている。実測値と比較すると、両橋ともに減衰は桁橋と斜張橋の中間に位置することが分かる。

## 3. 耐風安定性

### 3.1 桁の振動

ケーブルトラス橋の構造上の特徴として支間中央部

に支柱が設置される。また、竹花橋の場合、ねじれと曲げの固有振動数が近接しており、ほかの橋梁ではあまり例のない振動特性となっている。そこで、風洞実験により竹花橋の耐風特性を把握するとともに、固有振動数や支柱の及ぼす影響について検討した。

風洞実験は 1/50 の部分模型で実施した。ケーブルは影響が小さいものと考え省略している。また、対数減衰率は実橋測定結果(曲げ 1 次、ねじれ 1-1 次)に基づき 0.06 とした。図 3 に応答特性を示す。は迎角を表わしている。横軸は風速  $V$  を模型幅  $B$  と模型振動数  $f$  で無次元化した無次元風速とし、たわみ  $y$  とねじれ振幅  $\theta$  は最大応

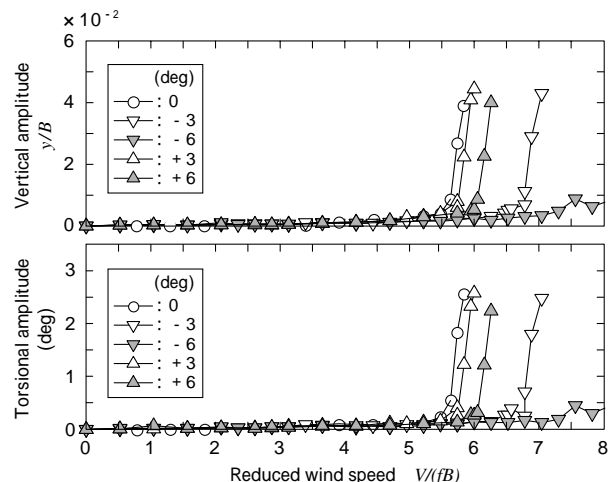


図 3 桁の風応答特性  
Fig. 3 Aerodynamic response of bridge deck

答の倍振幅成分とした。たわみ応答は  $B$  で無次元化している。実験の結果、渦励振は観測されず、発散振動（ねじれフラッター）の発現風速は 5.5 以上となる。これは実橋換算風速 85m/s に相当し、十分な耐風性能を有していることが分かる。

次に、支柱の有無による比較を図 4 に示す。渦励振の応答を考慮するために対数減衰率は 0.02 としている。この結果、支柱の有無による応答の差はほとんどないことが分かる。ただし、支柱有の方がわずかに渦励振の応答が低下し、ねじれフラッタはやや安定化している。これは、橋梁のねじれ振動では支柱が風の流れ方向に振動することになり、空力減衰が付加されることによると考えられる。

### 3.2 ケーブルの振動

ケーブル系橋梁ではケーブル特有の振動現象として、渦励振、ウェイクギャロッピング及びレインパイブレーションの発生の可能性がある。そこで竹花橋を対象に、風によるケーブル振動の長期計測を実施した。調査期間は、2001 年 10 月～2002 年 3 月である。

図 5 に、平均風速と乱れ強さ（標準偏差 / 平均風速）の関係を示す。山間部に位置するために、乱れ強さが 0.2～0.7 と非常に大きいことが分かる。次に、瞬間風速とケーブル振動の関係を、風に対して後流側のケーブルを例に、図 6 に示す。最大振幅は 1.4mm と小さく、風速による影響もあまり見受けられない。

これらの結果を基に、ケーブルの耐風安定性について考察する。

1) 渦励振：渦励振の共振風速は  $U = f \times D / S_t$  ( $f$ : ケーブル 1 次固有振動数 2.95Hz,  $N$ : 振動次数,  $D$ : ケーブル外径 110mm,  $S_t$ : ストローハル数 0.2) より算出される。一般に渦励振は 2 次以上の高次の場合が多いとされるが、今回計測された範囲は 2 次振動 (3.3m/s) から 7 次振動 (11.4m/s) に相当する。測定された風速内では振幅は十分に小さく、特定の風速により振動が大きくなる現象も観測されておらず、渦励振の発生はないと言える。

2) ウェイクギャロッピング：ウェイクギャロッピングの発現する主な条件は、ケーブル間隔  $H : 1.5D \sim 6D$  とされる<sup>6)</sup>。計測の結果、後流側ケーブルの振幅は他方のケーブルと同等でありその値も小さく、ウェイクギャロッピングは観測されなかった。その要因は、各ケーブルが平行に配置されておらず、ケーブル間隔が 2.7D (支柱部) から 10.9D (端部) と変化するため、振動が励起されにくいものと思われる。

3) レインパイブレーション：過去の実橋観測結果<sup>7)</sup> から、レインパイブレーションは、無次元風速 20 以上において、低次モードで発現する可能性があると考えられる。竹花橋の場合、風速 6.5m/s 以上の状況下で、ケーブル 1 次振動 (3Hz) の発現の可能性がある。今回の調査では 3.2～8.5m/s の風速に対して、最大振幅は 0.3mm と小さく、レインパイブレーションは発生していないと言える。

### 4. 耐震性

ここでは、かさこ橋を対象に応答スペクトル法によ

る地震応答解析を行い、耐震性の評価を行う。入力地震動は道示の標準加速度応答 種地盤を用いた。モード減衰定数は、表 1 の実測値に基づき安全側に 0.4% (対数減衰率 0.025) とおいた。地域別補正係数は 1 としている。

橋軸方向及び橋軸直角方向入力時の主要点の加速度応答を表 2 に示す。橋軸方向入力による応答に比べ橋軸直角方向入力時の応答が大きくなっている。このとき、水

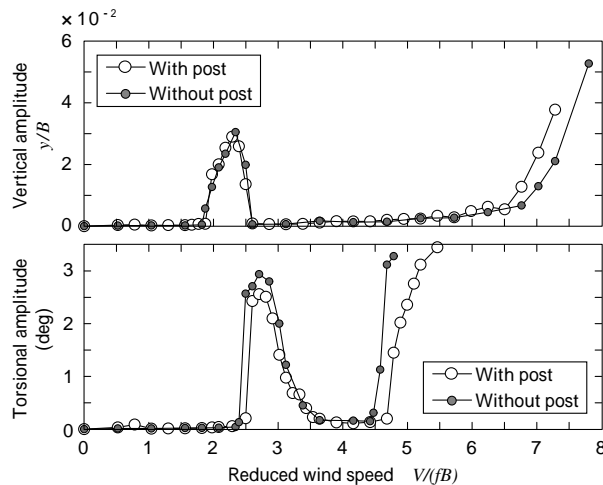


図 4 支柱の有無による応答の違い  
Fig. 4 Aerodynamic response of bridge deck with and without post

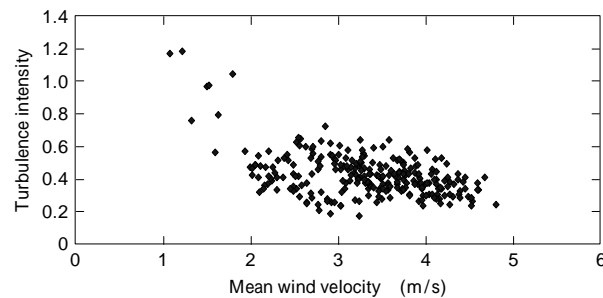


図 5 竹花橋の風応答特性  
Fig. 5 Wind properties at the Takehana Bridge

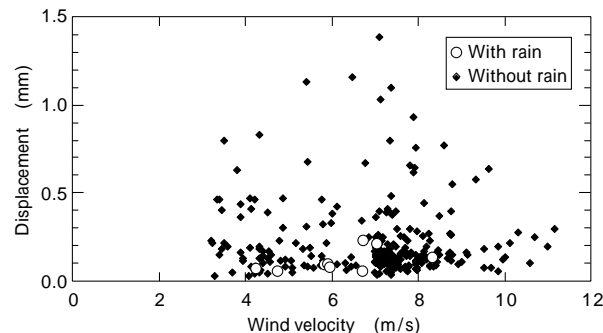


図 6 風によるケーブルの振動  
Fig. 6 Wind response properties of cable

表 2 地震時の加速度応答  
Table 2 Seismic response (acceleration)

		Input direction	
		Longitudinal (gal)	Transverse (gal)
Deck	Longitudinal	241.4	-
	Transverse	-	441.0
	Vertical	352.1	255.8
Tower	Longitudinal	170.8	-
	Transverse	-	589.2
	Vertical	241.6	49.5

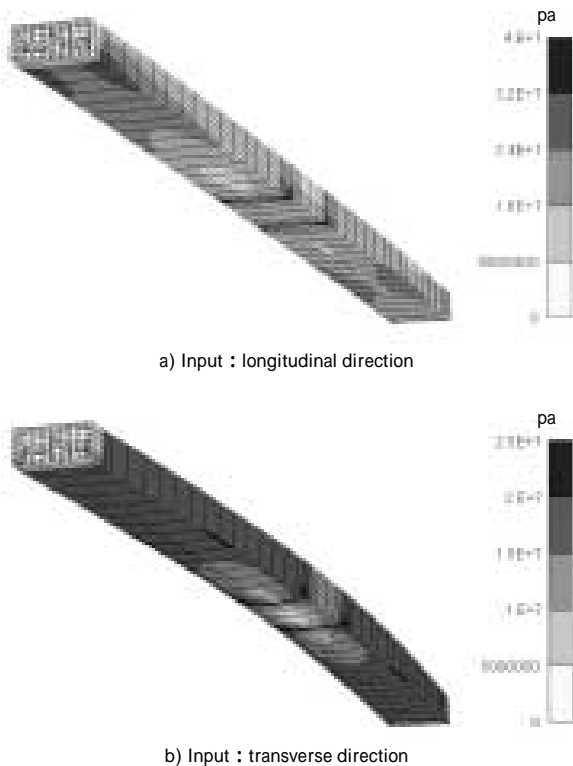


図7 桁のミーゼス応力コンタ図  
Fig. 7 Von Mises stress contour of main girder

平モード（図2参照）の応答が支配的となり、ねじれ変形はそれほど大きくなることが確認されている。これらは、通常の橋梁と同様な傾向であると言える。

次に、鋼桁に発生する応力について考察する。図7に応力コンタ図を示す。この結果、地震時に発生する鋼桁への応力は、最大でも32MPaと許容応力に比べ小さく、十分な耐震性を有していると言える。

### 5. 交通振動特性

交通荷重による振動や衝撃の影響で、静的に交通荷重が載荷されたときに比べて断面力や応力が増幅される。一般には、この効果を考慮した衝撃係数を活荷重に乗じて設計される<sup>8)</sup>。ここでは、かさこ橋を対象に車両走行実験及び動的応答解析を行い、ケーブルトラス橋の交通振動応答特性を把握し設計法について考察を行う。

走行実験では、自重26.5トンのラフテレーンクレーンを使用した。車体の上下及びピッチングの固有振動数はそれぞれ0.89Hz、1.38Hzである。速度を変えて走行し、桁、ケーブル及び車体の振動を計測した。一方、動的応答解析における路面モデルは文献8を参考に、ISO評価基準の「非常に良い状態」に相当するモデルとした。また、伸縮継手部の路面段差特性は両凸型の緩やかな段差<sup>9)</sup>でモデル化する。その路面波形を図8に示す。計

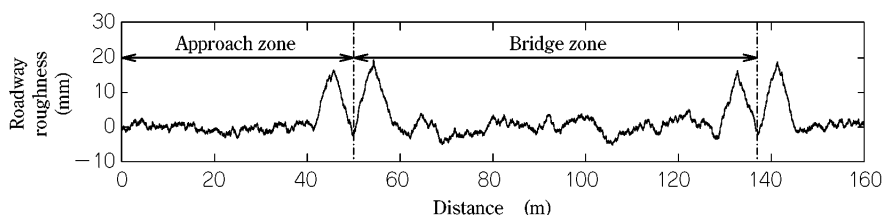


図8 路面の凹凸モデル  
Fig. 8 Model of roadway roughness

測・解析結果の例として、時速42km/hで走行した時の時刻歴応答波形を図9に、スペクトル波形を図10に示す。クレーンの応答は最大加速度を基準に正規化している。解析と実験結果はおおむね一致しており解析の妥当性が確認できる。

次に、衝撃係数を解析により求めた結果を道示による設計値と合わせ図11に示す。走行車両モデルは、交通振

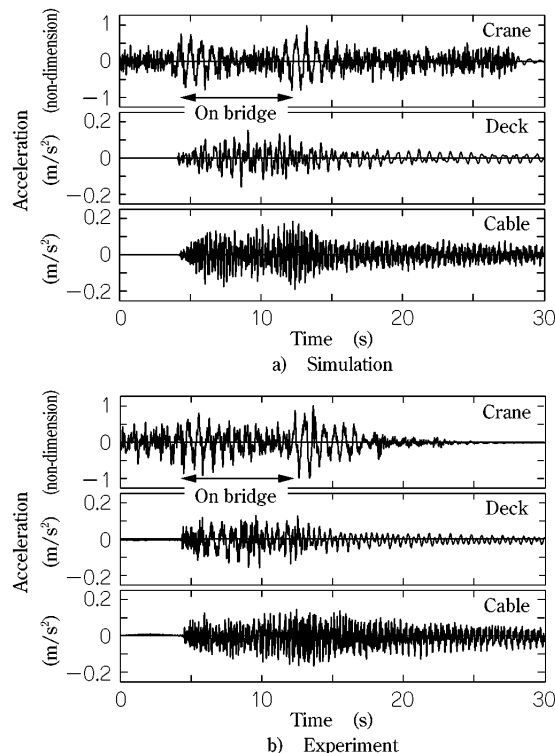


図9 走行振動応答  
Fig. 9 Dynamic responses under moving vehicles

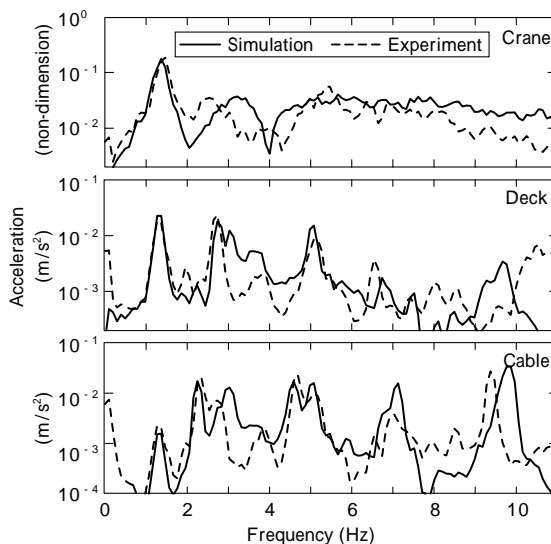


図10 走行振動の周波数分析  
Fig.10 Vibration spectra under moving vehicles

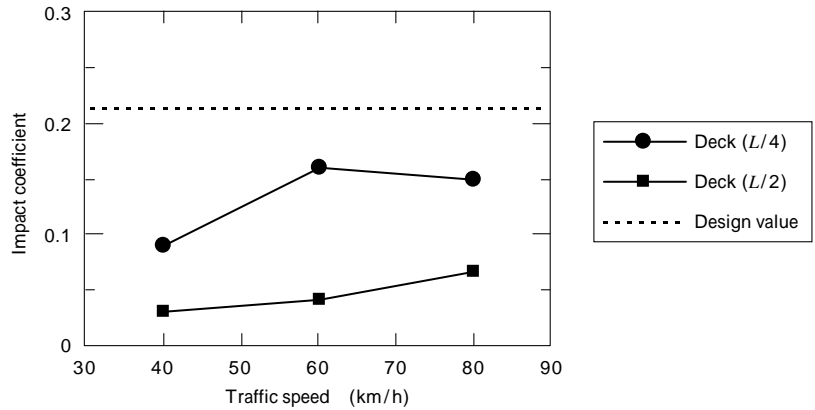


図11 衝撃係数解析結果

Fig.11 Simulated impact coefficient of girder

動的検討で多く使用されている総重量 20tonf の 4 自由度系モデルを利用した。衝撃係数の代表値として、支間長  $L$  の  $1/2$  点と  $1/4$  点の応答を表している。また、設計値における支間長  $L$  は、中央の支柱部を支持点とみなし、実際の支間長の  $1/2$  を用いている。この結果、衝撃係数は設計値に比べ十分に小さく、設計式は安全側の結果を与えることが分かる。

むすび=本研究では、ケーブルトラス橋の動的な特性について、実測及び FEM 解析により考察した。得られた知見は次のとおりである。

- 1) 風による桁振動について風洞実験の結果、渦励振は観測されず、フラッタやギャロッピングの発現風速も大きく、十分な耐風安定性を有していることが明らかとなった。また、支柱の与える影響はほとんどないことが分かった。
- 2) 風によるケーブルの振動について実橋計測の結果、渦励振やウェークギャロッピング、レインバイブレーションといった特異な振動現象は観測されなかった。
- 3) 地震応答解析を行い、発生応力は小さく、十分な耐震性を有していることを示した。

4) 車両走行による交通振動を実測及び解析により解明し、道示の設計法は安全側の値を与えることを明らかにした。

最後に、本論文をまとめるにあたり、日本道路公団四国支社殿には貴重なデータ、ご助言を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説，(2002)
- 2) 望月秀次ほか：構造工学論文集，Vol.44A (1998) p.1181.
- 3) 中川知和ほか：橋梁と基礎，2001-1 (2001) p.29.
- 4) 中川知和ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.49, No.2 (1999) p.23.
- 5) 社団法人日本道路協会：道路橋耐風設計便覧，(1991)
- 6) 独立行政法人土木研究所：共同研究報告書，Vol.134 (1995)
- 7) 財団法人土木研究センター：斜張橋ケーブルの耐風性検討報告書，(1993)
- 8) 川谷充郎ほか：土木学会論文集，No.570/I-40 (1997) p.231.
- 9) 米田昌弘ほか：鋼構造論文集，Vol.7-25 (2000) p.79.