

外ケーブルを用いたPC橋梁への振動実験 —— 天ヶ瀬橋 ——

佐久間 智^{*1}・江川 元幾^{*2}・前原 康夫^{*3}

1. はじめに

外ケーブルとは、図-1のように構造物にプレストレスを与える場合に部材断面の外側に配置したPC鋼材の総称であり、従来のように部材断面内に配置されたPC鋼材（内ケーブル）と区別している。

外ケーブル方式は内ケーブル方式と比較して、部材を薄くできることによる軽量化、コンクリートの打設性向上と、これによるコンクリート構造物の耐久性向上、さらにPC鋼材の点検管理が容易である。また、細目を工夫するとPC鋼材の再緊張・補修・補強が容易になる等の多くの利点がある。しかし、曲げ破壊耐力の算定、有効プレストレスの計算、偏向具（デビエータ）と定着部の設計方法と細部構造、外ケーブルの振動対策等について一般的な合意がなされていないという問題点がある。

ここでは、外ケーブルの問題点のひとつである車両走行時の外ケーブル振動について考える。つまり、主桁の振動数と外ケーブルの振動数が近い状態になると共振が生じ、定着部・デビエータ部において外ケーブルに振動による局部疲労が発生して耐久性の面で悪影響を与える可能性がある。

本文は、すでに完成しているPC橋梁に対して大型ダンプによる走行実験を実施し、桁・外ケーブルの振動性状の測定とその解析を行ったものである。

2. 天ヶ瀬橋の概要

振動実験を行った天ヶ瀬橋は、秋田自動車道の和賀～湯田間の建設のために工事用資材の運搬路として建設された橋長342mのPC橋梁である。本橋は人造湖である湯田錦秋湖を横過し、現在では工事を既に竣工して岩手県への移管が完了している。

天ヶ瀬橋の位置を図-2に、全景を写真-1に、全体一般図を図-3に示す。天ヶ瀬橋のなかでPC3径間連続箱桁ラーメン橋部(231m)に外ケーブルを使用した。この橋梁は、主桁自重には内鋼棒で抵抗し、後死荷重と活荷重には外ケーブルで抵抗するように設計した。外ケーブルの量は、各設計断面のPC鋼材量に対して中間支点（柱頭部）は約7%、径間中央では20%（導入緊張力換算）となった。外ケーブルの配置形状を図-4に示す。外ケーブルの採用の経緯は文献1)に、設計・施工は文献2)に記載されているので参考にされたい。

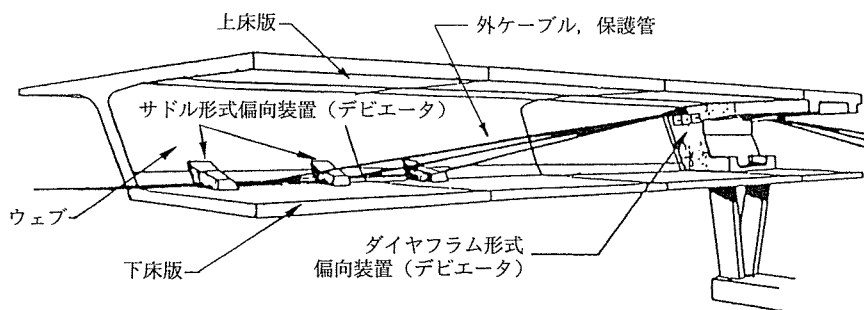


図-1 外ケーブル概念図

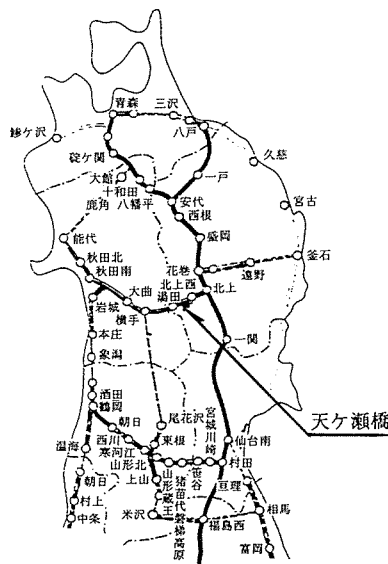


図-2 位置図

*1 Satoru SAKUMA : 日本道路公団 仙台建設局構造技術課 課長代理

*2 Motoki EGAWA : 日本道路公団 仙台建設局北上工事事務所 技術第一課長

*3 Yasuo MAEHARA : 八千代エンジニアリング(株) 構造部 部長

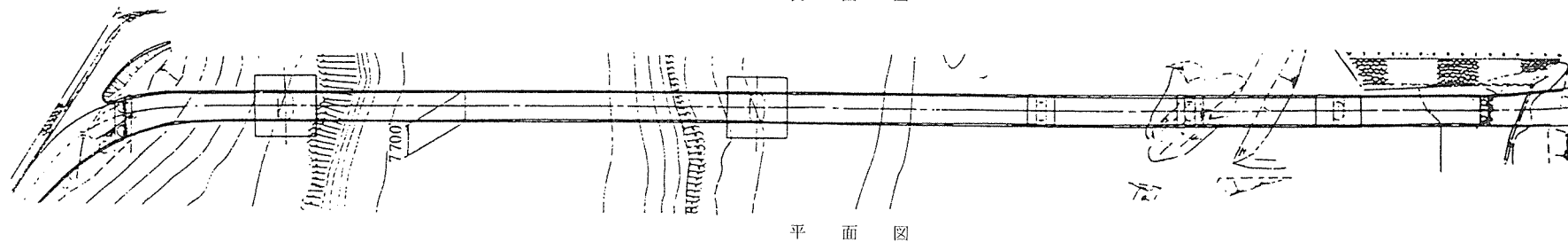
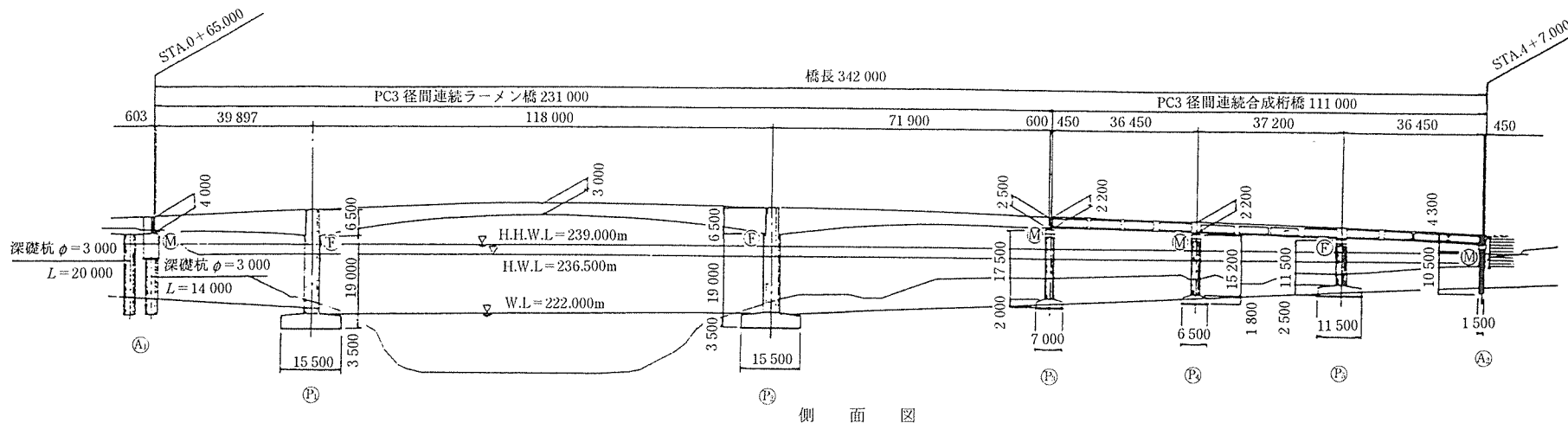
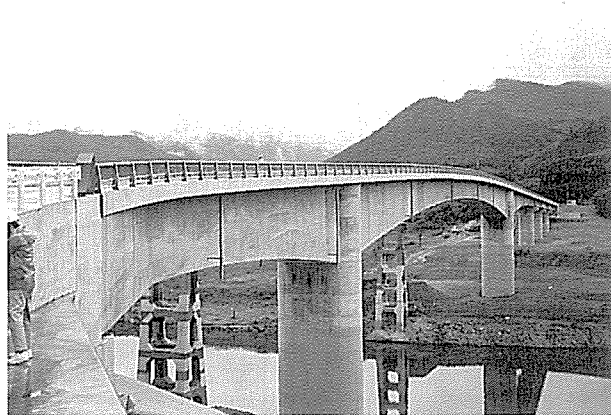
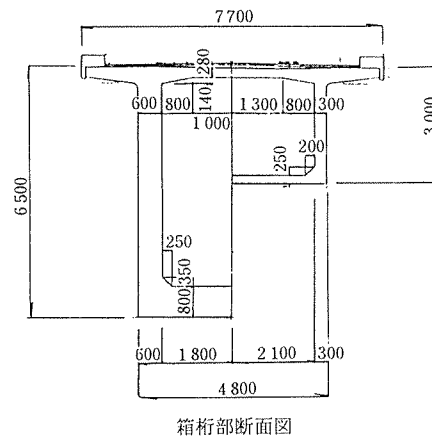


図-3 全体一般図



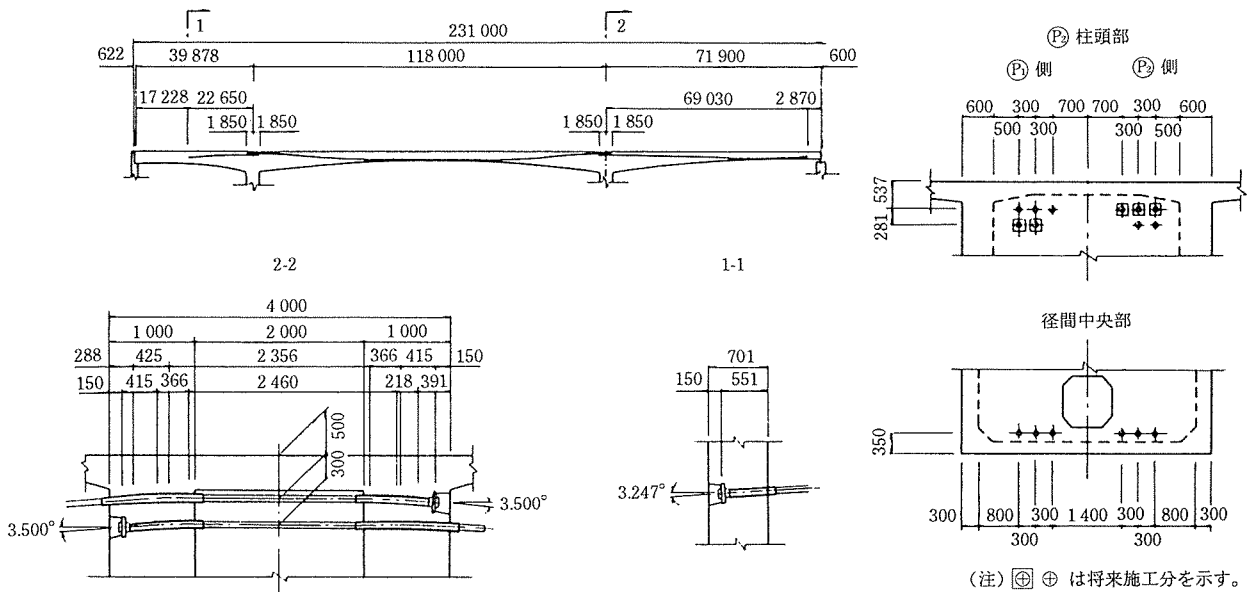


図-4 外ケーブル配置形状

3. 振動測定

測定は、一般車両の走行を規制したうえで、予め計量しておいた大型ダンプを試験車両として用い、速度・重量・走行パターンを変化させて主桁・外ケーブルの振動性状を計測した。試験に対するケースを表-1、試験車両の諸元を表-2に、各試験ケースに対する車両の走行状態を図-5に示す。さらに加速度計の配置とその測定番号は図-6に、設置状況は写真-2のとおりである。

表-1 試験ケース

ケース	車両重量 (t)	台数	走行状態	目標速度 (km/h)	備考
1	10	1	単独	GO: 40, 60, max RN: 40, 60, max	各1~2回走行
2	21	1	単独	GO: 40, 60, max RN: 40, 60, max	各1~2回走行
3	21, 10	2	連行	GO: 40, 60, max RN: 40, 60, max	各1~2回走行

GO: P₃橋脚→A₁橋台 RN: A₁橋台→P₃橋脚

表-2 試験車両の諸元

種別	前軸荷重	後軸荷重	全体重量
空車	4 180 kg	5 600 kg	9 940 kg
実車	5 960 kg	14 740 kg	21 180 kg

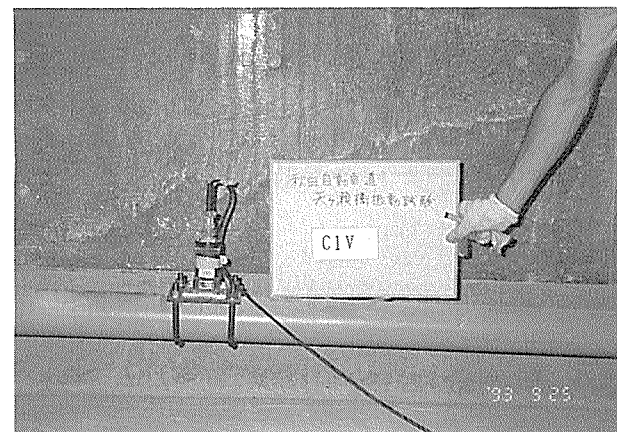


写真-2 加速度計の設置状況

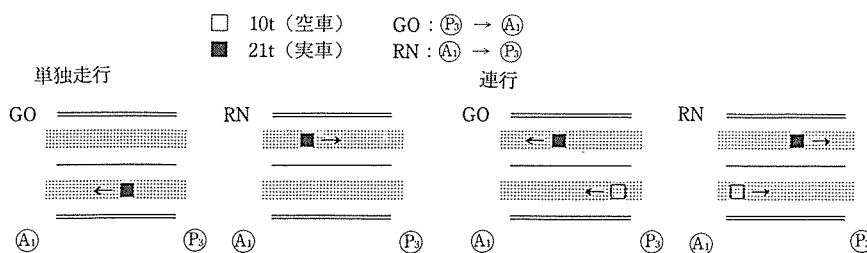


図-5 試験車両の走行状態

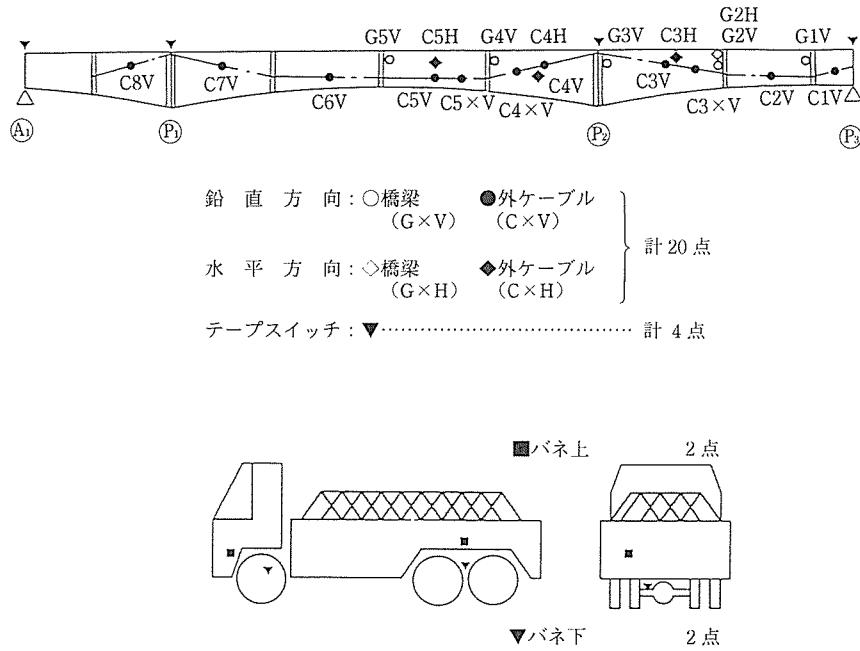


図-6 加速度計の配置と測点番号

4. 測定結果

4.1 加速度の代表波形

主桁および外ケーブルの振動加速度波形を図-7に示す。なお、この試験車両の走行パターンは、21 t と 10 t

の連行 (60 km/h) により、 $P_3 \rightarrow A_1$ というものである。上段より1・2段目は主桁の加速度波形 (1段目: G2Vは P_3 側の側径間, 2段目: G4Vは中央径間) である。3段目より7段目までの波形 (C1V~C5V) は、外ケーブルを示している。この位置関係は図-6の

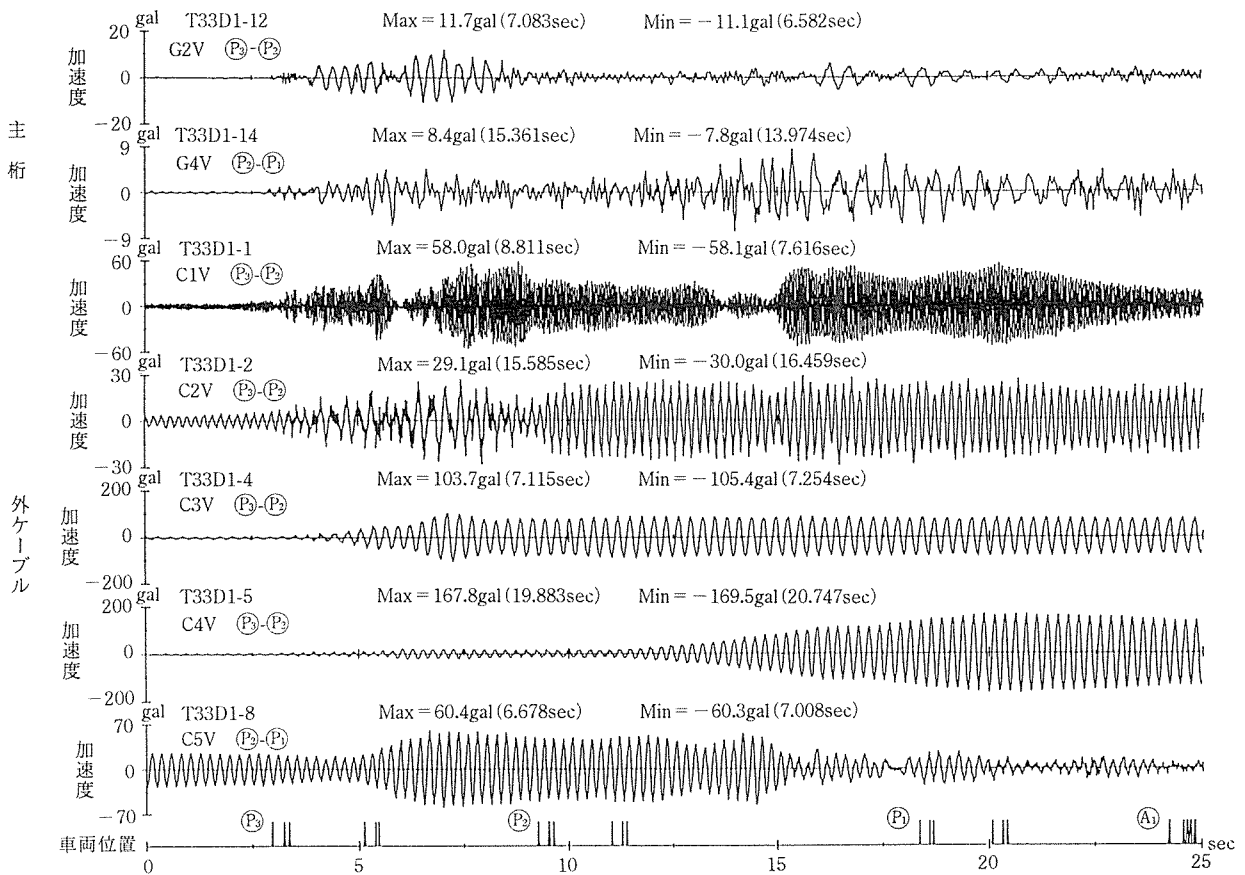


図-7 主桁と外ケーブルの加速度波形 (連行, 60 km/h)

とおりである。最下段は車両走行位置を示している。計測のために路面に大変薄いテープ状のセンサーを貼り付け、タイヤがセンサーを踏んだ時に感知するシステムである。

桁の振動は、車両自らが $P_3 \sim A_1$ 間を走行した際に大きくなるが、ケーブルには車両が $P_3 \sim A_1$ 間を走行する以前にすでに振動しているものがある。これは試験車両走行前の一般車両を通過させた際の振動が十分減衰していなかったこと、隣接桁である $A_2 \sim P_3$ 間の PC 3 径間連続合成桁の走行時の連成振動により振動したものと考えられる。

ここで加速度とは、ケーブル振動と桁の振動成分も含

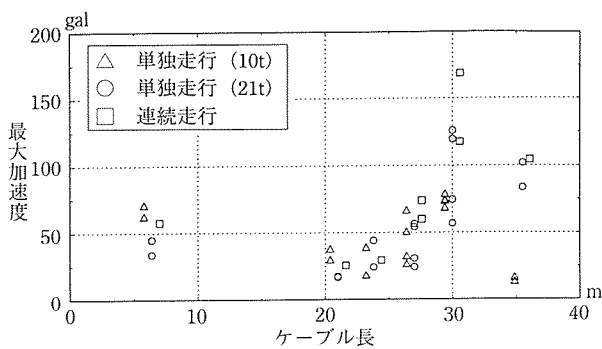


図-8 ケーブル長と最大加速度の関係

めた絶対加速度である。ケーブルの絶対加速度の最大値分布とケーブル長の関係を図-8 に示す。車種にもよるが、ケーブル長が長いほど加速度も増加する傾向にある。

4.2 変位の代表波形とその変位量

振動変位は、サーボ型加速度計の出力を増幅器内の演算回路(2回積分)を通じてアナログで変位信号に変換したものである。ここで測定したケーブルの変位振動は絶対変位であり、桁の変位振動も加わっている。ケーブルの純然たる変位を相対変位という。図-9 は、絶対変位(DC)と相対変位(RDC)の関係を示したものである。ケーブルの相対変位(RDC)の時系列波形を図-10 に示す。また、ケーブル長と相対変位の最大値の関係を図-11 に示す。これからケーブル長が長いほど相対変位

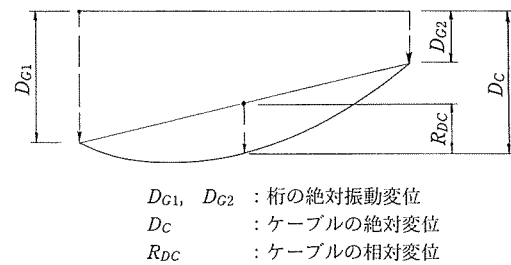


図-9 絶対変位と相対変位の関係

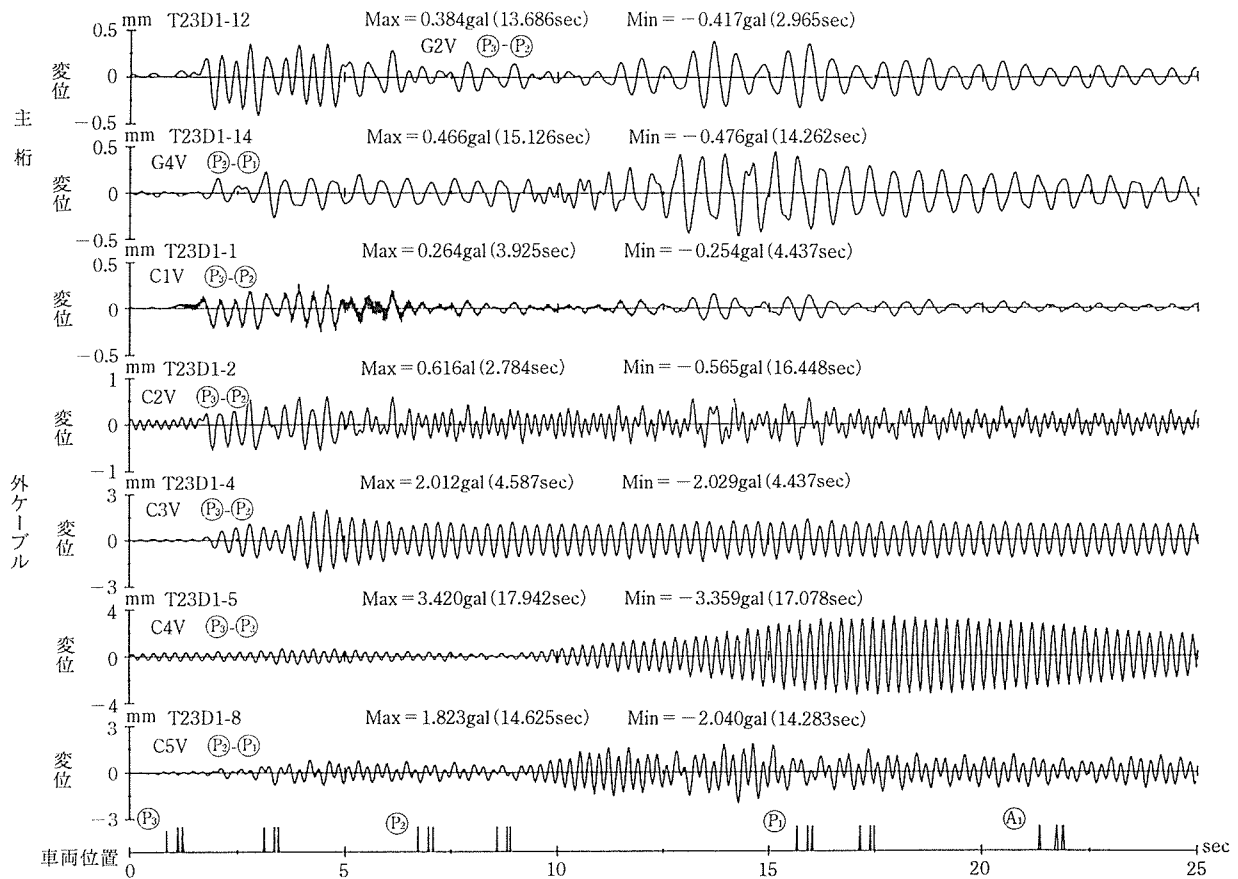


図-10 主桁、外ケーブルの変位波形(連行, 60 km/h)

◇研究報告◇

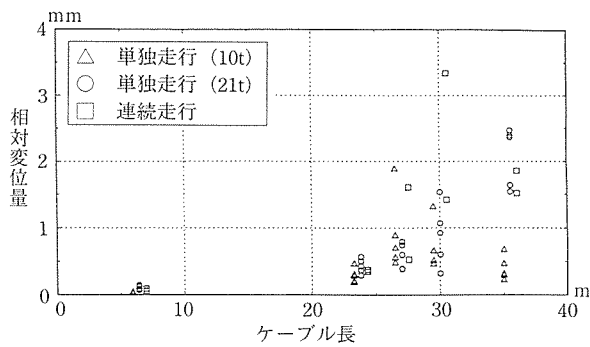


図-11 ケーブル長と相対変位量の関係

も大きくなる傾向にある。

4.3 FFTによるスペクトル解析

車両走行により、得られた変位データをFFT（高速フーリエ変換：Fast Fourier Transform）によりスペクトル解析を行った。図-12は、代表ケースにおける桁（側径間，中央径間）の絶対変位振動についてフーリエ

スペクトルを演算したものである。G 2 V（側径間）は1.8 Hz, 2.2 Hz, 2.8 Hzの卓越振動成分が見られるのに対して，G 5 V（中央径間）は1.8 Hzの卓越振動成分が主体である。

伝達関数は，2つの波形データ間における各振動数ごとの応答倍率（振幅比）を表すものである。フーリエスペクトルの分析結果から桁（分母）を基準としてケーブル（分子）との比をとると，その振動数軸において桁に対するケーブルの増幅率となる。

伝達関数の演算に際して求められるクロススペクトルは，伝達関数と同様に2つの波形データ間の振動数軸において，両者に共通の振動成分を表すものである。

$$\text{伝達関数} = (\text{ケーブルの振幅}) / (\text{桁の振幅})$$

$$\text{クロススペクトル} = (\text{ケーブルの振幅}) \times (\text{桁の振幅})$$

図-13は，横軸に振動数，上段の縦軸にはクロススペクトルを示し，下段の縦軸には応答倍率を示したものである。

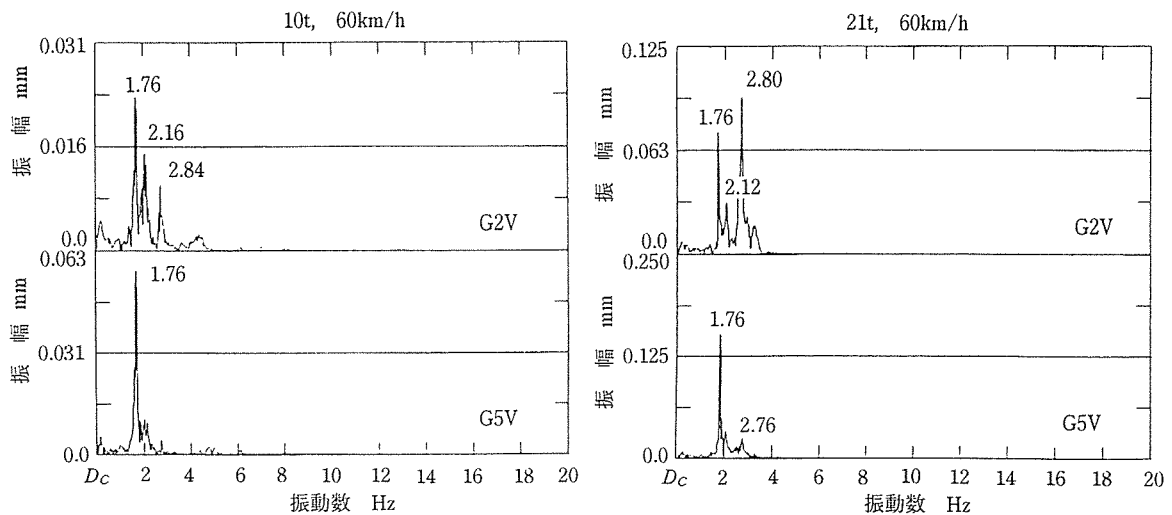


図-12 フーリエスペクトル 桁の絶対変位振動

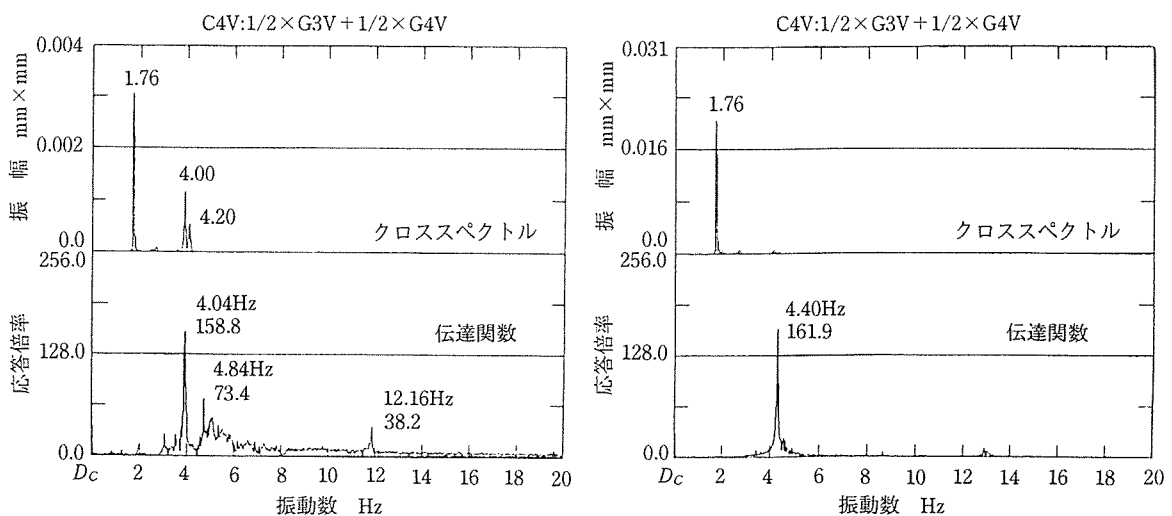


図-13 伝達関数ほか (21 t, 60 km/h の場合)

4.4 固有振動数

桁の固有振動数は、前述の車両走行載荷によるスペクトル解析結果から得られた。表-3に10t, 21tの各車両の走行時の桁の固有振動数を示す。例としてG1Vの連行では、1.76Hzが最も卓越しており、次は2.76Hzがという順である。ほとんど1.76Hzが卓越しているが10tの試験車の走行におけるG1V, G2Vでは2.80Hzのほうがより卓越する結果となった。

ケーブルの固有振動数は、一般車両が走行していない間に人力で外ケーブルをはじくことで自由振動させてその振幅データをデータレコーダに収録し、スペクトル分析をすることで算出した。ケーブル長と自由振動による固有振動数および車両走行時のスペクトル解析結果を併せて表-4に示す。

表-3 桁の固有振動数

	G1V	G2V	G3V	G4V	G5V
10t	2.80	2.80	1.76	1.76	1.76
	1.76	1.76			
21t	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76
	2.16	2.16	2.24		
	2.84	2.84			
連行	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76
	2.76	2.76			
	2.20	2.20			
	3.20	3.24			

表-4 ケーブル長と固有振動数

測点名称	ケーブル長 (m)	固有振動数 (Hz)	
		自由振動 (1次)	走行試験結果
C1V	6.400	20.5	20.6
C2V	23.690	5.08	5.08
C3V	34.998	3.44	3.44, 6.92, 10.32
C4V	29.649	4.04	4.04, 8.16
C5V	26.825	4.40	4.40, 8.80
C6V	26.825	4.40	4.40
C7V	29.649	3.96	3.96
C8V	20.132	5.96	6.00

4.5 減衰定数

桁の減衰定数は、図-14に示すように車両走行時のフーリエスペクトル結果から求める方法と車両が桁を通過した後の自由振動から求める方法がある。フーリエスペクトルから求めた結果は、

$$1.78 \text{ Hz} \rightarrow h=0.01268$$

$$2.80 \text{ Hz} \rightarrow h=0.01486$$

であり、自由振動より求めると、

$$1.76 \text{ Hz} \rightarrow h=0.008846$$

である。スペクトルから求めると一般的に多少高めになるといわれており、自由振動では低次の振動数しか減衰波形が得られない。これから桁の減衰定数は約0.01前後であることがわかる。

ケーブルの減衰定数は、各ケーブルの自由振動の振幅データをレコーダに出力し、 x 波目の振幅を読みとることで算出した。ケーブル長と減衰定数の値を表-5に、ケーブル長と減衰定数の関係を図-15に示す。

減衰定数を h とすれば、 m 番目の振幅 y_m と $m+1$ 番目の振幅 y_{m+1} から、

$$h=1/(2 \times \pi) \times \log_e (y_m/y_{m+1})$$

となる。表-5のなかの減衰定数の下の0~100の数字

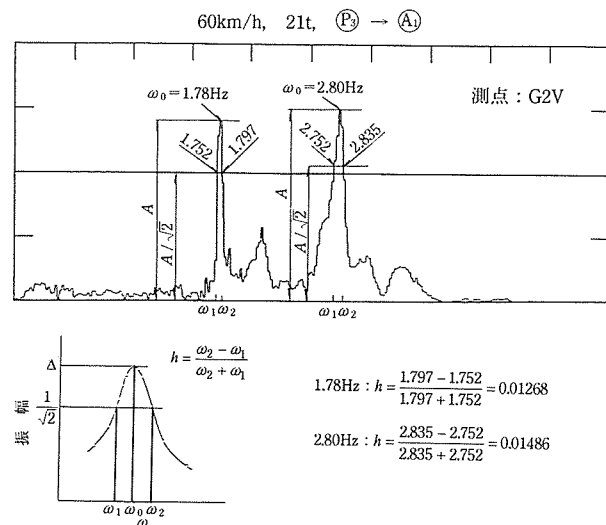


図-14 桁の減衰定数 (車両走行時のフーリエスペクトルより)

表-5 ケーブル長と減衰定数

測点	ケーブル長 (m)	減衰定数 (%)					平均
		1~100	100~200	200~300	300~400	400~500	
C1V	6.400	0.1665	0.1521	0.1458	—	—	0.1548
C2V	23.690	0.0664	0.0947	0.0393	—	—	0.0668
C3V	34.998	0.0238	0.0342	0.0316	0.0370	0.0483	0.0350
C4V	29.649	0.1316	0.1029	—	—	—	0.1172
C5V	26.825	0.0645	0.0228	0.0266	0.0319	—	0.0365
C6V	26.825	0.0270	0.0290	0.0269	—	—	0.0277
C7V	29.649	0.0344	0.0301	0.0138	0.0233	—	0.0254
C8V	20.132	0.0120	0.0175	0.0146	0.0179	0.0159	0.0156

◇研究報告◇

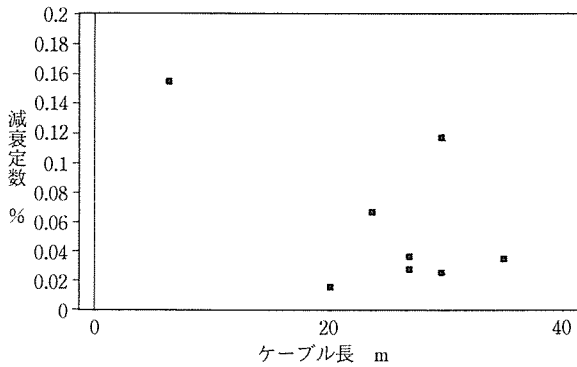


図-15 ケーブル長と減衰定数

は、振幅回数が0から100までの振幅に相当するもので、さらにその下の各数字は各ケーブルの減衰定数を示している。

4.6 振動倍率

強制加振されたケーブルの動的な相対変位振幅 δ_C と入力となるケーブル計測位置と対応した主桁の変位振幅 δ_G との比を振動倍率 (δ_G/δ_C) という。

出力波形から求めたケーブルの相対変位および桁の変位の最大値を用いて、各ケーブルの振動倍率を求めると

表-6 振動数比

ケーブル	ケーブルの固有振動数 f_{C0} (Hz)	桁の固有振動数 f_{G0} (Hz)	振動数比 f_{G0}/f_{C0}	記号
C 1 V	20.50	2.80	0.137	■
C 2 V	5.08	2.80	0.551	■
C 3 V	3.44	2.80	0.814	■
C 4 V	4.04	1.76 4.08	0.436 1.010	+ ■
C 5 V	4.40	1.76 4.08	0.400 0.927	+ ■

ともに、その値を用いて振動数比との関係を図-16に示す。ただし、振動数比は、表-6に示す値を用いている。側径間の卓越振動数は2.80 Hzが主であり、中央径間は1次が1.76 Hzであるが、6次の4.08 Hzの方が卓越するため、(それぞれの桁部位の振動数)/(各ケーブルの固有振動数)で振動数比とした。ケーブルの相対変位と桁の変位の関係は、試験ケースによってバラツキはあるが、一時回帰(切片はゼロ)の勾配から振動倍率と振動数比の関係より求めた。

5. 解 析

解析は、次の項目からなる。

- ・固有振動解析(車両、主桁、外ケーブル)
 - 固有振動数, 振動モード
- ・主桁の振動解析
 - 応答波形, 応答スペクトル
- ・外ケーブルの応答解析
 - 外ケーブルの応答

5.1 固有振動解析

走行解析に先立ち、車両・主桁・外ケーブルの固有振動解析を行った。車両については、車体は鉛直方向と回転、前輪と後輪は鉛直方向の4自由度系にモデル化し、主桁は棒部材と各節点の集中質量でモデル化した。固有振動解析の結果、測定振動数と比較し、測定値と一致するような条件を決定して走行解析に反映した。

固有振動解析は、図-17に示すモデルである。A₁橋台とP₃橋脚の可動支承は、ゴム支承であることから自由としてモデル化した。また、A₁~P₃のPC3径間連続箱桁ラーメン(外ケーブル使用)に隣接するP₃~A₂のPC3径間連続合成桁は、走行解析において桁の鉛直振動を考え上部構造のみのモデル化した。

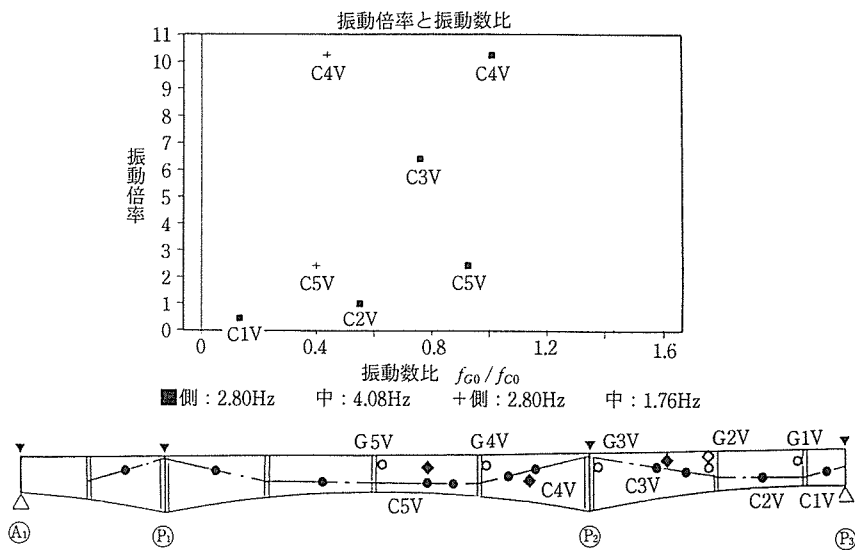


図-16 振動倍率

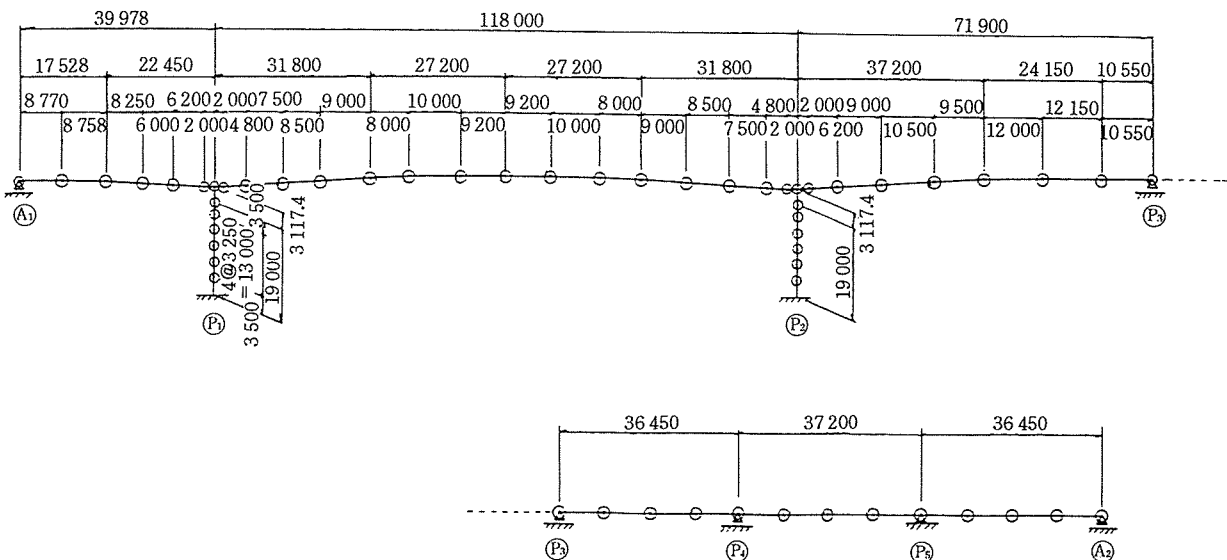


図-17 固有振動解析モデル

(1) 主桁の固有振動解析

設計時の固有振動解析の結果を図-18に示す。この時の解析条件は以下のとおりである。

A₁, P₃の可動支承の橋軸方向の抵抗は無視する。橋脚下端は固定とする。

桁と橋脚の結合部分は剛な仮想部材とする。

コンクリートの弾性係数は、旧道路橋示方書を適用して主桁は $E_c=3.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ ($\sigma_{ck}=400 \text{ kgf/cm}^2$)、橋脚は $E_c=3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ ($\sigma_{ck}=300 \text{ kgf/cm}^2$) とした。また、部材のせん断変形は無視した。

振動試験による固有振動数と解析の固有振動数を比較すると表-7のようになった。参考として可動支承をピ

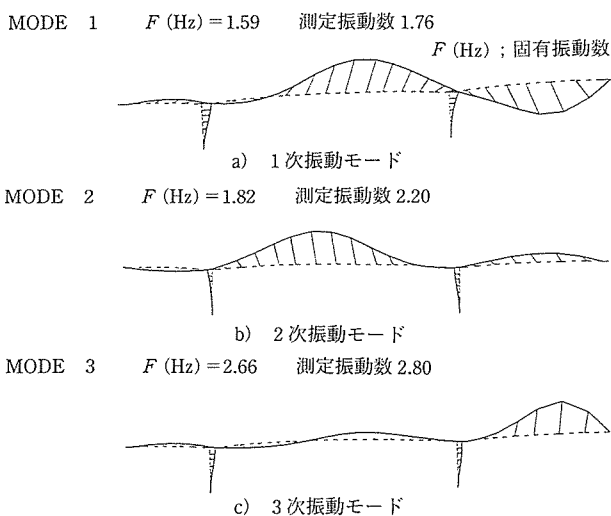


図-18 設計時の固有振動

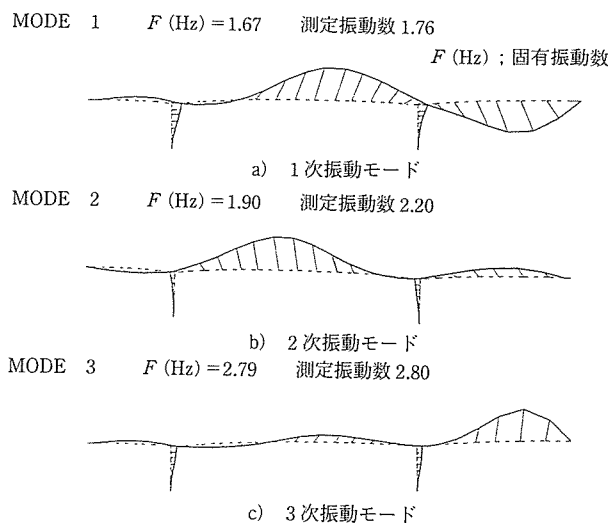


図-19 固有振動モード (CASE 1)

表-7 振動試験と解析との固有振動数の比較

ケース	支 承	1 次 振 動	2 次 振 動	3 次 振 動	6 次 振 動	
実験による卓越振動数		1.76	2.20	2.80	4.20	
設計時の固有振動解析	FREE	1.59	1.82	2.66	4.17	
◎ CASE 1	コンクリート弾性係数 1.10 倍	〃	1.67	1.90	2.79	4.37
CASE 2	コンクリート弾性係数 1.15 倍	〃	1.70	1.95	2.85	4.47
CASE 3	コンクリート弾性係数 1.20 倍	〃	1.74	1.99	2.91	4.56
参 考 1	コンクリート弾性係数 1.00 倍	PIN	1.73	-	2.47	3.80
参 考 2	コンクリート弾性係数 1.10 倍	〃	1.81	-	2.59	

◇研究報告◇

ンとした場合も解析した。結果を要約すると以下のとおりである。

・振動試験による固有振動数は設計時に比べやや高い。

1次振動 1.76/1.59=1.11倍

3次振動 2.80/2.66=1.05倍

・上記の違いを剛性に換算すると1~2割増となる。

・ゴム支承のせん断ばねは無視しうるほど小さい。

測定において側径間の桁鉛直振動に最も卓越して現れる3次振動に着目してコンクリートの弾性係数を1.10倍とした場合で走行解析を実施した。

図-19は、可動支承の橋軸方向をフリーとし、コンクリートの弾性係数を1.10倍とした場合の固有振動モードである。

図-20は、測定振動モードと解析振動モードを比較し

たもので、解析による1次モードは測定に比べP₂~P₃の側径間の振動が大きい傾向にある。測定の2次振動の卓越は小さくなるため、測定モードの誤差も大きいと思われる、解析との誤差も大きい。3次振動モードは、P₂~P₃の側径間が大きく振動し、中央径間とは同位相となるモードである。

(2) 外ケーブルの固有振動解析

表-8よりケーブルの剛性無視した解析の固有振動数は、試験による振動数よりも低く、ケーブルの曲げ剛性を考慮して固有振動解析を実施すると、長さの短いケーブルほど固有振動数は高くなる。ケーブルが短いほど曲げ剛性が振動数に影響する。ケーブル長と固有振動数の関係を図-21に示す。これより測定と解析の固有振動数はよく一致している。短いケーブルも曲げ剛性を考慮すると一致する。

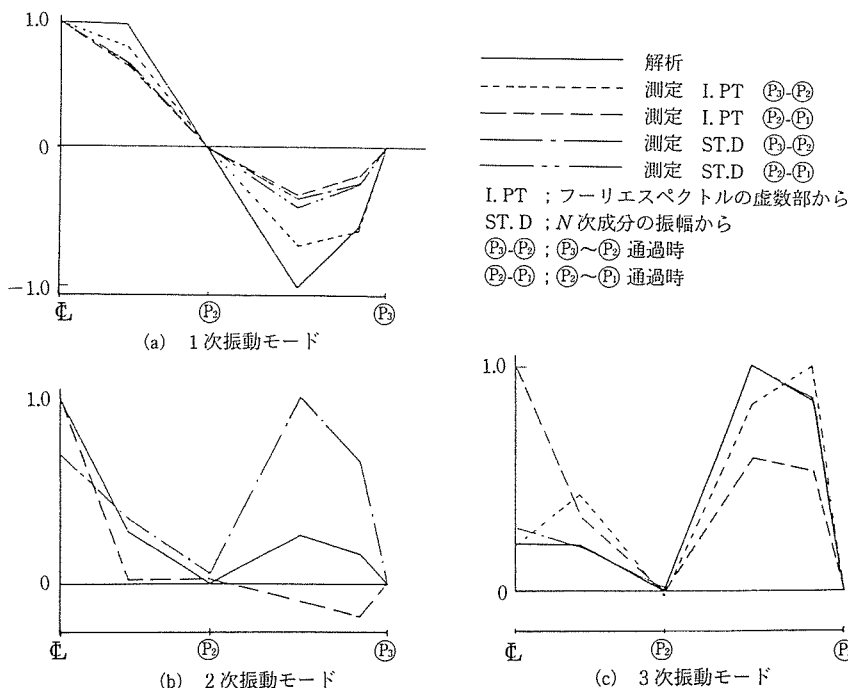


図-20 測定と解析との振動モードの比較

表-8 ケーブル曲げ剛性を考慮した固有振動数

	A ₁ -P ₁	P ₁ -P ₂				P ₂ -P ₃		
	C 8 V	C 7 V	C 6 V	C 5 V	C 4 V	C 3 V	C 2 V	C 1 V
長さ (m)	20.132	29.649	26.825	26.825	29.649	34.998	23.690	6.400
張力 (tf)	105.5	107.2	108.3	108.4	106.8	109.2	106.1	107.1
解析 f ₁	5.35	3.66	4.07	4.07	3.65	3.13	4.56	16.94
解析 f ₂	5.50	3.73	4.16	4.16	3.72	3.15	4.65	19.98
測定 f	5.96	3.96	4.40	4.40	4.04	3.44	5.08	20.5
測/f ₁	1.114	1.082	1.081	1.081	1.107	1.099	1.114	1.210
測/f ₂	1.084	1.062	1.058	1.058	1.086	1.092	1.092	1.026
F ₂ (tf)	124.0	120.9	121.2	121.3	126.0	130.2	126.5	112.7

f₁: 剛性無視の振動数

f₂: 曲げ剛性考慮の振動数

F₂: 測定結果の振動数となるような張力をf₂を用いて算定した。

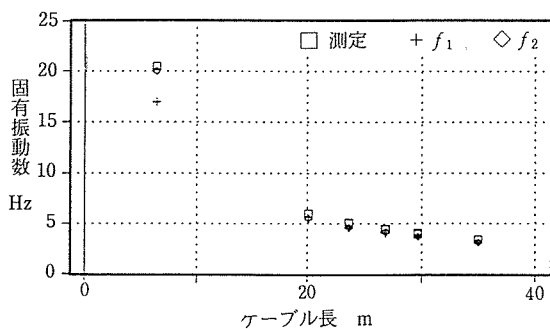


図-21 ケーブル長と固有振動数との比較

(3) 車両のモデル化と固有振動解析

車両は、図-22に示す4自由度にモデル化した。車体は剛体として重心に鉛直方向と回転方向の自由度を考慮

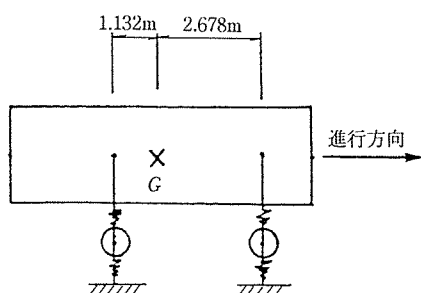


図-22 車両のモデル化

表-9 試験車の測定諸元

試験日	平成5年9月27日	
	試験車1	試験車2
	実車	空車
前輪反力(tf)	6.098	4.248
後輪反力(tf)	15.082	5.692
総重量(tf)	21.180	9.940
前輪-後輪距離(m)	3.810	3.810
車体長(m)	7.610	7.610

表-11 車両の固有振動数

試験車	試験車1 実車	建設省 土研	金沢大学 梶川	試験車2 空車
1次振動数(Hz)	[1.86] (1.96)	2.35	1.71	[2.69]
2次振動数(Hz)	[2.41] (3.00)	3.17	2.64	[3.64]
3次振動数(Hz)	[15.01] (15.24)	11.63	15.00	[15.07]
4次振動数(Hz)	[15.05] (18.33)	15.48	15.07	[15.19]
実験の振動数	車体前 1.9 Hz程度 車体後 3.1 Hz程度			

[] 内は、梶川のパネを用いた場合
() 内は、建設省土研のパネを用いた場合

表-10 車両の諸元

	試験車	試験車1 実車	建設省 土研	金沢大学 梶川	試験車2 空車
重 量	車体および載荷(tf)	19.180	17.0	18.0	7.940
	回転慣性モーメント(tf・cm ²)	5.81×10 ⁵	4.00×10 ⁵	6.75×10 ⁵	2.88×10 ⁵
	前輪の重量(tf)	0.4	0.7	0.4	0.4
	後輪の重量(tf)	1.6	2.3	1.6	1.6
長	前輪-後輪間(m)	3.810	3.85	4.00	3.810
	前輪から重心(m)	2.678	2.84	2.50	1.964
	後輪から重心(m)	1.132	1.01	1.50	1.846
パ ネ 定 数	懸架部の前輪(tf/cm)	1.2	1.5	1.2	1.2
	懸架部の後輪(tf/cm)	4.8	12.0	4.8	4.8
	タイヤの前輪(tf/cm)	2.4	2.2	2.4	2.4
	タイヤの後輪(tf/cm)	9.6	8.8	9.6	9.6
減 衰 定 数	懸架部の前輪(tf・sec/cm)	0.005	0.017	0.005	0.005
	懸架部の後輪(tf・sec/cm)	0.020	0.140	0.020	0.020
	タイヤの前輪(tf・sec/cm)	0.006	0.002	0.006	0.006
	タイヤの後輪(tf・sec/cm)	0.024	0.007	0.024	0.024

した。前輪・後輪は鉛直方向に1自由度とし、懸架部のパネで車体と繋がれ、タイヤのパネで路面と繋がれている。

試験車は、事前の測定より表-9に示す値が判明している。しかし、試験車のパネ定数や減衰定数は不明であるので文献3), 4)のパネ定数を用いて固有振動解析を実施した。

車両の諸元を表-10に、固有振動数を表-11に示す。建設省土木研究所のモデル³⁾は金沢大学のモデル⁴⁾よりも固く、2次振動数が高くなる。試験車1実車は土研のパネを使用した方が実験の振動数に一致するようである。

(4) 路面のモデル化

走行解析では、橋軸方向に等間隔(5cm)で路面の凹凸を仮定する必要がある。ここでは路面のパワースペクトル密度を仮定して算定した。路面のパワースペクトル密度は、文献5)の考え方によると、試験車の伝達関数を実験的に求めておき、走行時の車両の振動から逆算することができる。

路面のパワースペクトル $S(\Omega)$ は、路面1mの凹凸の数 Ω (cycle/m) と次式の関係にある。

$$S(\Omega) = a \times \Omega^{-n}$$

表-12 路面の最大凹凸

		路面のパワースペクトル		最大路面凹凸 (mm)	$a=0.001$ 基準倍率
		a	n		
a による比較	凹凸形状 1	0.001	1.792	2.165	1.0000
		0.0055	1.792	5.077	2.3452
		0.01	1.792	6.846	3.1623
形状による比較 a, n 一定	凹凸形状 1	0.0055	1.792	5.077	
	凹凸形状 2	0.0055	1.792	4.672	
	凹凸形状 3	0.0055	1.792	4.525	

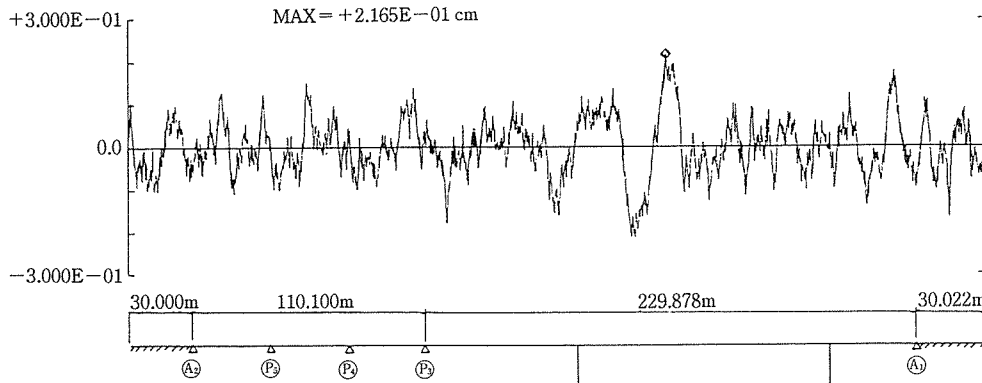


図-23 解析に用いた路面の凹凸

a : 路面の平滑度を表すパラメータ

n : 一般に 2 前後の値

高速道路の良好な路面では、 $a=0.001$ と $n=1.792$ であるとしている。天ヶ瀬橋の解析に使用するパワースペクトル密度は、 $a=0.01\sim 0.001$ の幅をもって仮定する。

試験車が伸縮継手を通過時に衝撃的な加速度波形が見られないため、解析では伸縮継手には特別に段差等は設けないものとした。

路面のパワースペクトル密度が既知ならば、路面の凹凸は三角関数により以下の式で求まる。

$$\Delta(x) = \sum_{k=1}^N a_k \times \sin(\omega_k \times x + \phi_k)$$

$\Delta(x)$: 路面の凹凸

ω_k : 路面の円周波数
($=2\pi\Omega = 2\pi/\lambda$)

λ : 波長

1つの路面パワースペクトル密度を仮定すれば、路面の凹凸は数々の形状が算定できる。走行解析に使用した最大凹凸を表-12、図-23に示す。

(5) 走行解析

走行解析は、設計時のコンクリートの弾性係数を 1.10 倍した固有振動解析結果を用いて行った。路面、車両、橋梁の減衰定数をパラメータとして表

-13 に示すケースの解析を行った。

図-24 にケース 5 の桁の応答加速度波形を示す。路面凹凸を他のケースの半分としたケースであるが、 P_2-P_1 では測定加速度とほぼ一致するが、 P_3-P_2 では測定値よりも大きい。

ケーブルの応答加速度倍率スペクトルとは、ケーブル

表-13 解析ケース

ケース	路面凹凸	方向	走行	速度	車両モデル	
1	$a=0.001^{*1}$ $n=1.792$	$P_3 \rightarrow A_1$	単独 20 t	45 km/h	CAR-1	全次数一定 $h=1\%$
2	$a=0.01^{*1}$ $n=1.792$	$P_3 \rightarrow A_1$	単独 20 t	45 km/h	CAR-1	"
3	$a=0.001^{*1}$ $n=1.792$	$P_3 \rightarrow A_1$	単独 20 t	50 km/h	CAR-1	"
4	$a=0.001^{*1}$ $n=1.792$	$P_3 \rightarrow A_1$	単独 20 t	45 km/h	CAR-2	"
5	$a=0.0055^{*1}$ $n=1.792$	$P_3 \rightarrow A_1$	単独 20 t	45 km/h	CAR-1	"
6	$a=0.0055^{*1}$ $n=1.792$	$P_3 \rightarrow A_1$	単独 20 t	45 km/h	CAR-2	"
7	$a=0.0055^{*1}$ $n=1.792$	$P_3 \rightarrow A_1$	単独 20 t	45 km/h	CAR-2	1次 $h=0.5\%$ その他 $h=2\%$
8	$a=0.0055^{*2}$ $n=1.792$	$P_3 \rightarrow A_1$	単独 20 t	45 km/h	CAR-2	"
9	$a=0.0055^{*3}$ $n=1.792$	$P_3 \rightarrow A_1$	単独 20 t	45 km/h	CAR-2	"

路面パワースペクトル $S(\Omega) = a \cdot \Omega^{-n}$ a : 路面の平滑度の係数
路面凹凸 $*1$; 凹凸形状 1 $*2$; 凹凸形状 2 $*3$; 凹凸形状 3
車両 CAR-1 : 金沢大学のバネ定数
CAR-2 : 建設省土研のバネ定数

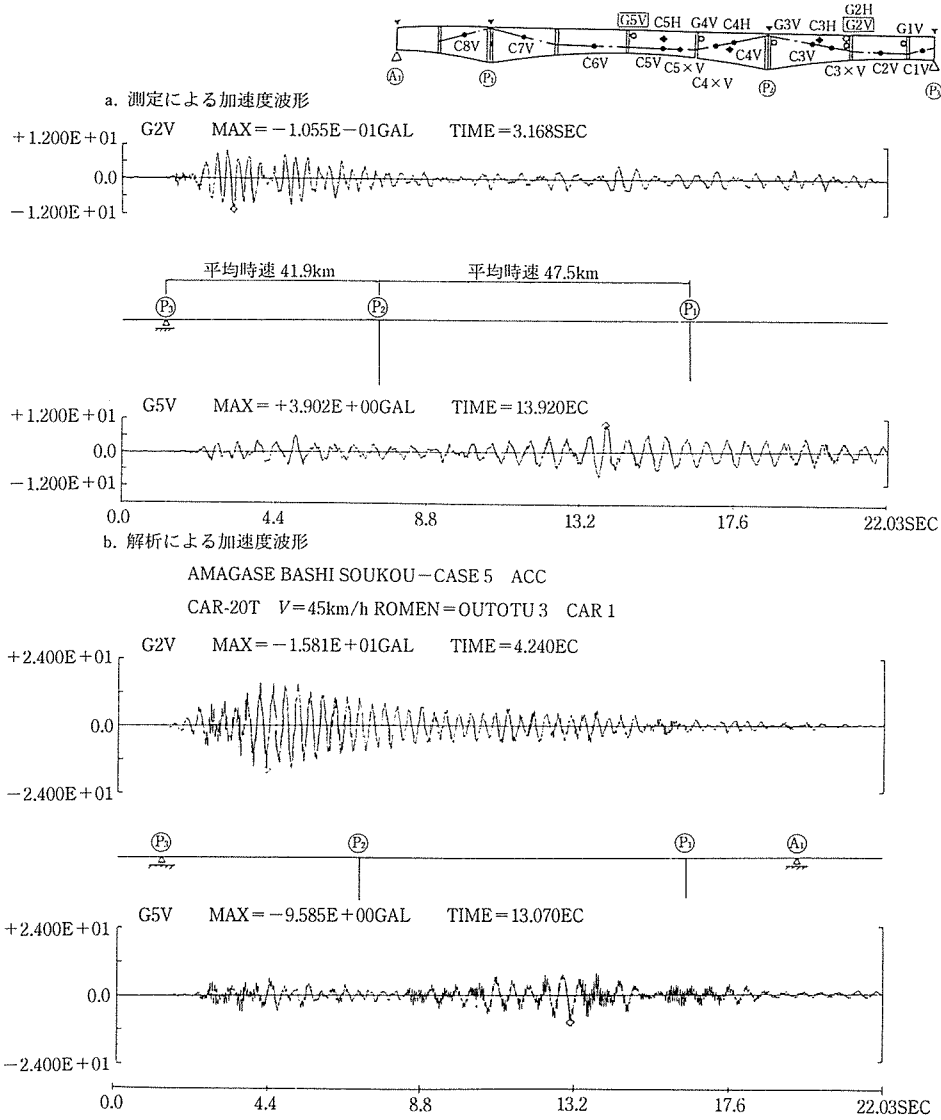


図-24 桁の応答加速度波形 (測定と CASE 5)

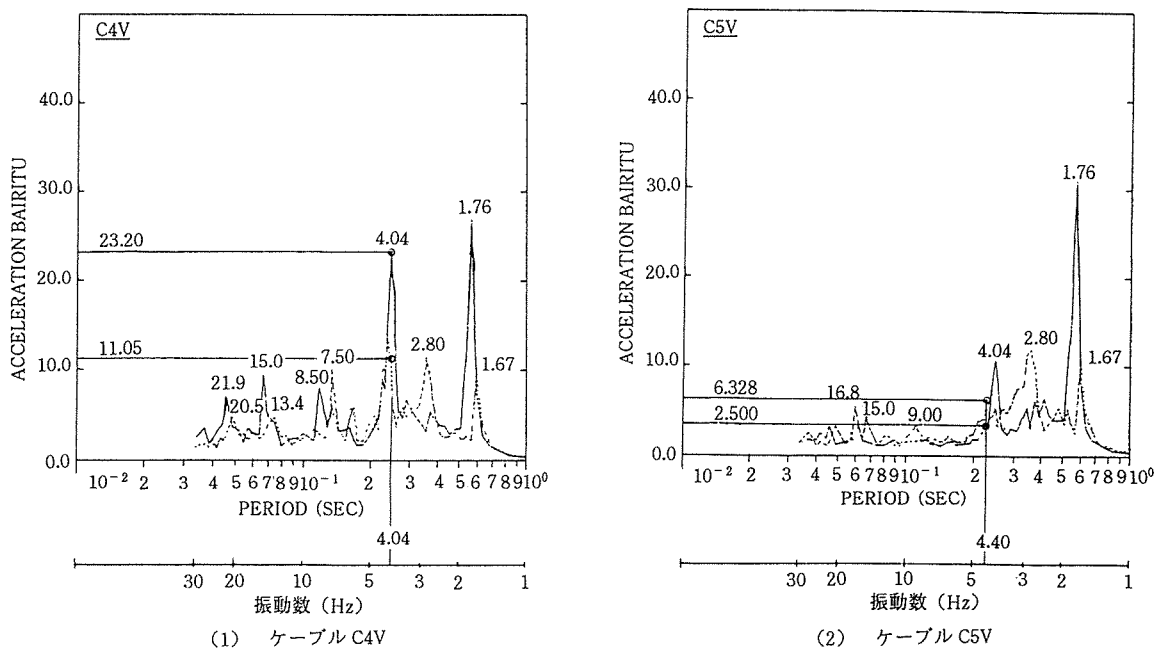


図-25 ケーブルの応答加速度倍率スペクトル (CASE 7)

◇研究報告◇

両端の桁の平均応答加速度波形の最大値に関する、ケーブルの最大応答加速度との倍率を各種のケーブル固有振動数について算定したものである。図-25にケース7の各ケーブルの値を示す。ケーブルC4Vの固有振動数は4.04 Hzであり、桁の曲げ2次振動と共振している。このC4Vの応答倍率は測定では23.2倍である。解析では路面形状が異なるとスペクトルのピークが微妙にずれてケーブルの固有振動数に対する倍率も11倍と異なった。

(6) デビエータと定着部付近の局部応力

デビエータと定着部付近の局部応力は、図-26に示すケーブル端部の回転を拘束した場合にケーブル端部に発生するモーメントから算定すると

$$\theta = \pi/L \times D$$

$$M_B = 2 EI \theta / L$$

$$\sigma = M_B / I \times y$$

θ : ケーブル端部の接線角

M_B : ケーブル端部の曲げモーメント

σ : ケーブルの曲げ応力

L : ケーブルの長さ

D : ケーブル中央の変位

EI : ケーブルの曲げ剛性

y : 図心から外縁までの距離

C4Vの最大共振の場合で $\sigma = 1.6 \text{ kgf/cm}^2$ であり、疲労が問題となるレベルではない。

文献(6)の考え方より局部応力を算出してみる。図-27は外ケーブル端部における曲げ性状を示す。軸力 T を有するケーブルが、たわみ角 ϕ_0 の振幅を生じた場合の固定端付近に生じる曲げ応力(局部応力)を計算する

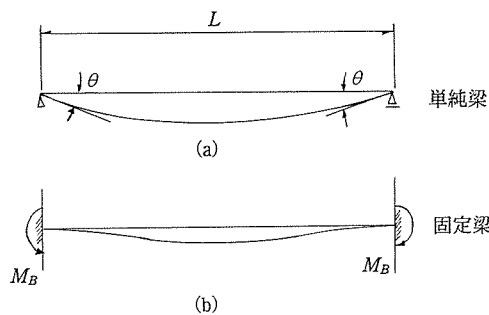


図-26 ケーブル端部の拘束モーメント

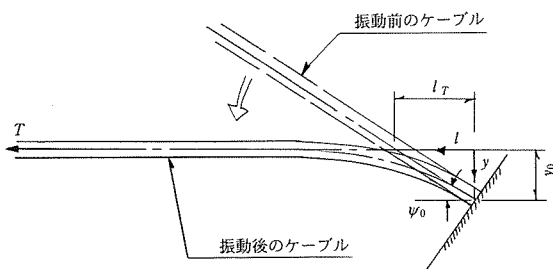


図-27 外ケーブル端部の振動等の曲げ性状

ものである。測定時の最大変位 3.34 mm から局部応力を算定すると 98 kgf/cm^2 となる。前に述べた $\sigma = 1.6 \text{ kgf/cm}^2$ に比べて大幅に大きい値となった。応力の算出方法を以下に記す。

$$M = T \times y = EI \frac{d^2 y}{dl^2}$$

$$y = \frac{\phi_0}{g} \cdot e^{-gl}$$

$$g = \sqrt{\frac{T}{EI}}$$

ここに、

M : ケーブルに発生する曲げモーメント

T : ケーブルに作用している軸力

ϕ_0 : たわみ角

C4Vの振幅が3.344 mmの場合

12本中の1本の剛性を用いた場合 $\phi = 12.4 \text{ mm}$

断面積 $A = 1.208 \text{ mm}^2$

断面二次モーメント $I = 0.116 \text{ mm}^4$

有効プレストレス $\sigma_{pe} = 9580 \text{ kgf/cm}^2$

たわみ角 $\phi_0 = \pi/L \times D$

$$= 3.543 \times 10^{-4} \text{ rad}$$

局部応力 $f_{B1} = \phi_0 \times (D/2) \times (A/I)^{1/2}$

$$\times (\sigma_{pe} \times E)^{1/2}$$

$$= 98 \text{ kgf/cm}^2$$

考え方の違いから振動により発生する局部応力が大きく異なる (1.6 kgf/cm^2 , 98 kgf/cm^2) が、斜張橋の活荷重による応力変動 ($400 \sim 1300 \text{ kgf/cm}^2$) と比較しても、はるかに小さな値であることから、疲労が問題となる応力変動値ではない。

6. 検討結果

天ヶ瀬橋の振動試験結果および解析結果をまとめると以下の事項が考えられる。

- ① 応答変位・応答加速度はケーブルが長いほど大きい傾向を示している。
- ② 走行速度と応答値の関係はバラツキが多く明瞭な傾向は現れていない。
- ③ 空車 10 t と実車 21 t では、重量が重いほど応答も大きい結果となっているが、連行との違いは明確ではない。
- ④ ケーブルの減衰定数は、0.02~0.15% と小さい。
- ⑤ 測定による桁の卓越振動数は、1.8 Hz, 2.2 Hz, 2.8 Hz, 4.2 Hz であり、5.0 Hz 以上の振動成分は殆ど含まれていない。
- ⑥ 桁の固有振動解析は、コンクリートの弾性係数を 1.10 倍とすれば、振動数および振動モードともに概ね測定結果と一致する。

- ⑦ ケーブルの固有振動数は、ケーブルが長くなるほど低くなる。ケーブル長が短い場合には、ケーブルの曲げ剛性を考慮しないと測定値と試験値は一致しない。
- ⑧ 桁の変位とケーブルの応答相対変位との比率である振動倍率は、最も短い6.4 mのケーブルを除けば1~10倍である。この倍率はケーブルの固有振動数と桁の固有振動数との近接度と関係が強い。最も倍率の大きいケーブル(C 4 V)は、共振現象となっているためである。
- ⑨ ケーブルの振動により発生する局部応力は、拘束曲げモーメントに着目すると $\sigma=1.6 \text{ kgf/cm}^2$ と低く疲労を問題とするレベルではないが、ケーブルの張力を考慮すると 98 kgf/cm^2 と大きく異なる。しかし、斜張橋の活荷重による応力変動(400~1 300

kgf/cm^2)と比較してもはるかに小さな値であることから、疲労が問題とはならない。

参 考 文 献

- 1) 日野虎彦・長江 進：天ヶ瀬橋の設計，プレストレストコンクリート，Vol. 32, No. 5, Sept. 1990
- 2) 有村慎一郎ほか4名：外ケーブル併用によるラーメン橋の設計と施工—東北横断自動車道 天ヶ瀬橋—，プレストレストコンクリート，Vol. 34, No. 5, Sept. 1992
- 3) 横山ほか：自動車走行モードと道路橋の衝撃係数，土木学会論文集，1990. 10
- 4) 梶原ほか：橋梁振動の計測と解析，技報堂出版，1993.
- 5) 小森為雄：応用土木振動学，森北出版，1974. 4
- 6) Wyatt, T.A. : A secondary stress parallel wire suspension cable, ASCE, ST 7, pp. 39~59, 1960

【1994年9月29日受付】