

---

---

# 投稿論文

---

---

## 投稿くださる各位へのお願い

1. なるべく大勢の方々に投稿頂くため原稿枚数は、投稿原稿、依頼原稿とも規定以内(7. 参照)といたします。なお原稿料は規定枚数で打切りとなりますのでご了承ください。
2. 添付図はトレース(線図のみ墨入れ)または第2原図を原則とします。青図添付の場合は墨入れトレース代の一部負担を願いますので予めご了承ください。
3. 執筆者は依頼原稿の場合を除き正会員に限ります。したがって未加入者の場合は予め手続きいたしますのでその旨お申し出ください。
4. 本機関紙は現在、複数制編集委員による特集号形式としており、それぞれ特定のテーマによる依頼原稿が先行するため、投稿原稿は延期される傾向にありましたが、年間発行6冊のうち、2冊程度は投稿原稿による機関誌を予定し、また特集号でも数点は掲載余地を残すようにいたしますので、今後は投稿後半年以内には掲載されます。
5. 別刷は規定により50部を論説、報告、資料に限り贈呈いたします。それ以上希望される場合は実費増刷となりますので、原稿の表紙に部数をご記入願います。
6. 報告の投稿には必ず英文タイトル、英文著者名をつけてください。
7. 投稿原稿の制限枚数は次のとおりです。

論	説	刷上り6ページ(協会原稿用紙36枚、ただし図表、写真含む)以内		
報	告	// 8 // ( // 48枚 // ) //		
資	料	// 4 // ( // 24枚 // ) //		
工事	ニュース	// 1 // ( // 6枚 // ) //		
質	疑	応答 // 0.5 // ( // 3枚 // ) //		
読	者	の	声	// 0.5 // ( // 3枚 // ) //

## 中国自動車道宇佐川橋振動試験報告

内 田 道 雄\*  
迎 邦 博\*\*  
井 谷 計 男\*\*\*

### 1. ま え が き

中国自動車道宇佐川橋における強制振動試験の結果をここに報告する。

我が国が、世界有数の地震国であることは、今更、ここで述べるまでもなく周知の事実である。このため、土木構造物は橋梁、ダム、港湾施設、電力施設など、いずれの方面においても地震時における安全性を多分に要求されている。

本橋においても、詳細設計時この点を充分考慮し、静的解析のほか、動的解析を行って、構造物の安全性を確認している。

近年の耐震工学の発展、および電子計算機の急速な進歩と普及に伴い、動的解析（地震応答解析等）が簡単にできるようになり、構造物の振動性状はかなりの精度で捕えられるようになってきている。しかし、まだ、構造物の振動を量的に捕えるには、多くの問題が残っている。例えば、地域、地盤による振動特性の把握、最大地動加速度の確率論的予測等、地震動そのものに対する未解決の分野、また減衰定数、固有振動数（固有周期）、構造物の剛性等、構造物自体の諸性状に対する解析上の問題点である。

本稿は、世界でもほとんど例を見ない長支間を有する非対称両端固定アーチ橋で、その振動性状も明らかに特異なものをも有している。また、コンクリートアーチ橋の振動特性に関する研究は、非常に少なく、今回の振動試験をその資料の一つとして、将来の発展に寄与することを目的とする。

一般に振動試験は、設計時仮定された構造系が実際の条件を満足するかどうかを検討するのが主な目的である。例えば、部材の支持条件（可動沓がそれなりの挙動を示すか）、部材結合条件（メナーゼ沓がピンとして作動しているか）が設計仮定どおりの動きをするかどうかの検討である。

今回の振動試験では、上述のことを踏まえ、以下に示

すものを求めた。

- 1) 固有周期，固有振動数
- 2) 減衰定数
- 3) モード実測値

これら実測値と計算値を比較検討し、構造物の実際の振動性状を把握する。

本報告書では、強制振動試験の方法から本稿の振動定数、静的解析と動的解析の関係、耐震性までを述べることにする。

### 2. 宇佐川橋の概要

宇佐川橋の設計・施工に対しては各種の報告書<sup>1),2)</sup>が出されているので、ここでは割愛して概要だけを述べる。

宇佐川橋は、山口県の北東部に位置する玖珂郡錦町の一級河川錦川支流の宇佐川を渡る位置に建設された鉄筋コンクリート固定アーチ橋である。本橋の一般図を図—1に示す。アーチリング施工については、ピロン、メラソ併用工法を採用し、スプリング部からワーゲンで施工し、メラソ部も同じワーゲンを一部改良して打設ブロック長を長くとっている。また、構造的な特徴として、クラウン部においてアーチリングと上床版を一体で施工している。

### 3. 強制振動試験

振動試験には、強制的に外力を与えてその振動定数を測定するものと、常時微動測定のように構造物の不規則振動を測定し、パワースペクトルを求め構造物の振動性状を解析するものがある。

今回の試験方法としては、直接的に共振々動数が得られ、実績のあるものとして、強制的に周期的加振力を与え、その振動変位を測定する方法を採用した。

振動実験までのフローチャートを図—2に示す。なお振動試験は、昭和57年9月6日から9月18日まで約2週間にわたって行われた。

#### 3.1 予備検討

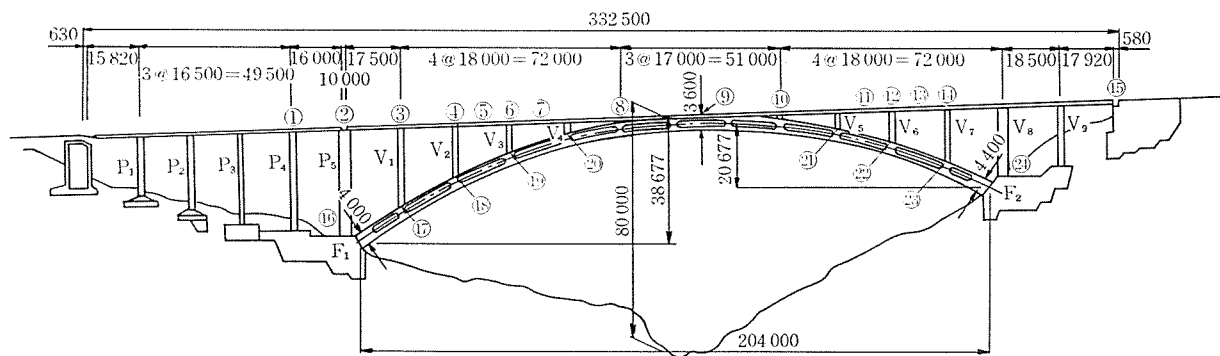
振動実験を行う前段階として、起振機の選定、その加振力の決定等を行った。中国自動車道帝釈橋の振動実験

\* 日本道路公団建設第二部工務第二課

\*\* 住友建設（株）技術研究所副課長

\*\*\* 住友建設（株）技術研究所

制 面 図



標準部断面図

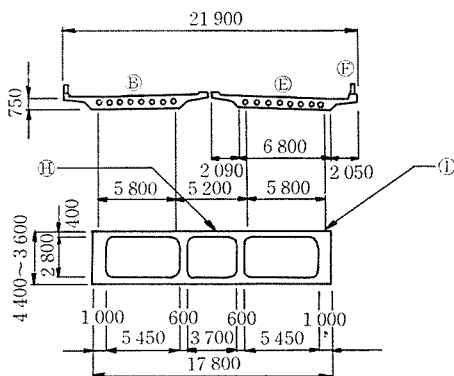


図-1 一 般 図

の実績から、起振機は最大起振力 50 t 以上の能力が必要と判断されたが、予備検討は公団所有 VE-50 を使用

するとの前提で行った。

予備計算のフローチャートを図-3 に示す。

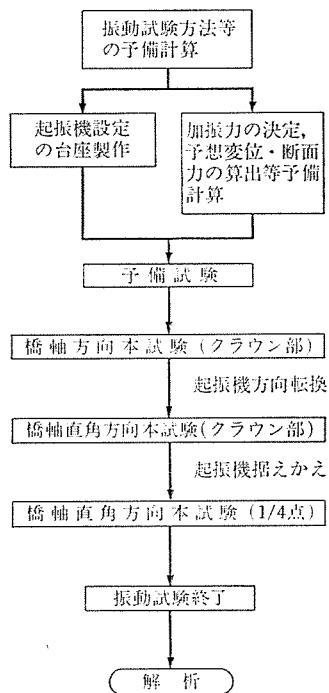


図-2 振動実験までの  
フローチャート

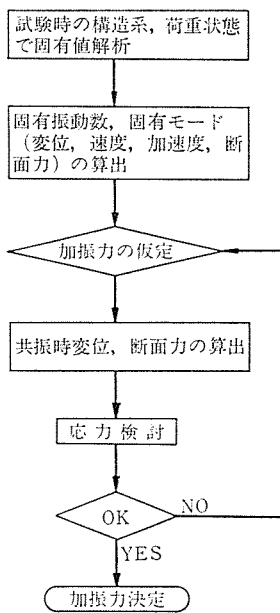


図-3 予 備 計 算

固有値解析は、変位法で  $\sum m_i U_i^2 = 1$  として正規化したものを求めた。

(1) 予備振動解析<sup>3)</sup>

予備振動解析は、次のように行う。

$$x_{is} = \frac{P \cdot u_{is} \cdot u_{ps}}{2 h \omega_s^2}$$

ここに、 $x_{is}$  :  $i$  点の  $s$  次における変位

$P$  : 加振力

$u_{is}$  :  $i$  点の  $s$  次におけるモード

$u_{ps}$  : 起振機位置の  $s$  次におけるモード

$h$  : 減衰定数

$\omega_s$  : 固有円振動数 ( $s$  次)

本橋は、非常に複雑な構造系を有しているので、解析的に解くことは困難である。よって、図-4 のように集中化した質点系で、変位法により振動解析することにした。部材条件、結合条件等、解析上の諸仮定は、5. 振動解析において述べる。

(2) 加振力の決定

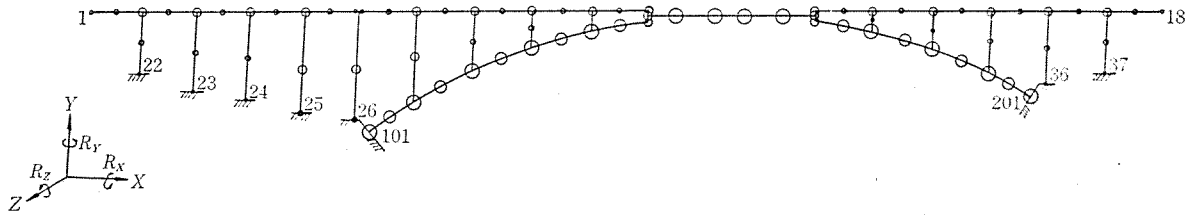


図-4 集中質点系

(1) で述べた振動解析の手法で、アーチ部、上床版の許容引張応力度を零とし、鉛直材等については、許容鉄筋応力度を  $1200 \text{ kg/cm}^2$  として許容加振力を求めた。

### 3.2 実 験

実際の地震時において構造物は、水平・鉛直方向の振動を受け、また、地震波の入射角度も一定ではない。

ここでは、構造物の振動性状を把握するのが目的であるので、次の3ケースに限って実験することとした。

- ① クラウン部橋軸方向 (水平加振)
- ② クラウン部橋軸直角方向 (水平加振)
- ③ 1/4 点橋軸直角方向 (水平加振)

起振機は、50 t 起振機 (VE-50, 公団試験所所有) を用いることとし、鉛直方向の加振は、起振機の機構上できないため、今回は行わないこととした。

振動計は、図-1 に示すように 24 か所設置し、各々振動方向の水平成分、鉛直成分を測定した。

測定波形としては、各ピックアップ (AVL-25) で測定された加速度波を電氣的に積分した変位波形とした。測定時、ハイカットフィルターを使って高周波成分を除

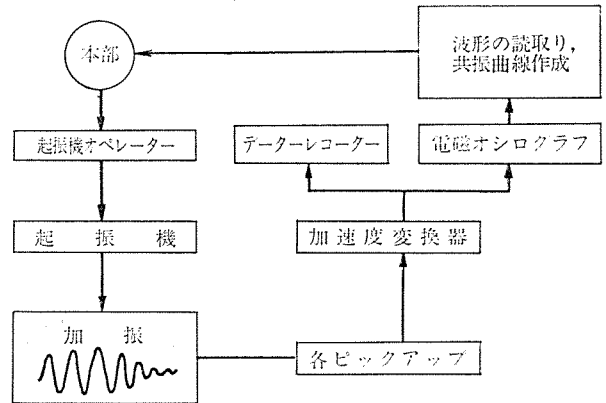


図-6 測定フローチャート

くことも考えられるが、これは解析時においても可能であるので、測定波はそのままの記録を残すこととした。

測定フローチャートを図-6 に示す。測定時の位相チェックのため、起振機からのパルス信号、および周期マーカも併せてデータレコーダーに記録した。

## 4. 試験結果

### 4.1 波形の整理

振動試験で得られた計測波形をデジタル化し、共振曲線を描く (図-7, 8)。

### 4.2 共振振動数一覧

実験により得られた共振振動数を表-3, 4 に示す。なお、共振振動数と固有振動数の関係を図-9<sup>1)</sup> に示

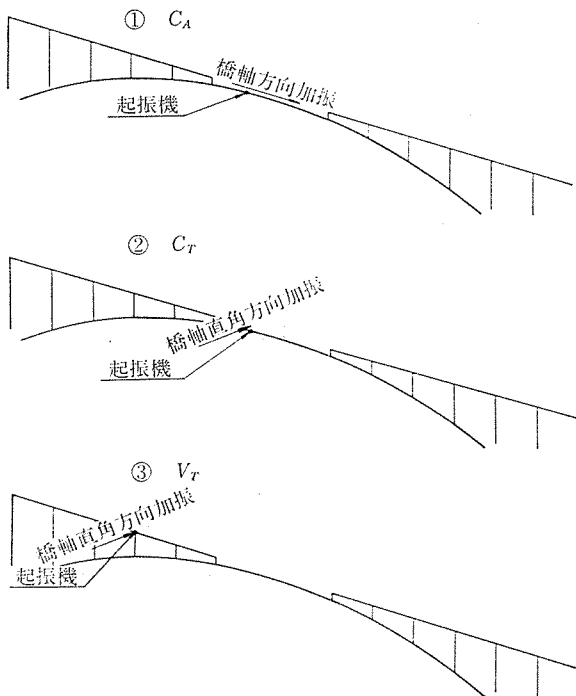


図-5 実験ケース

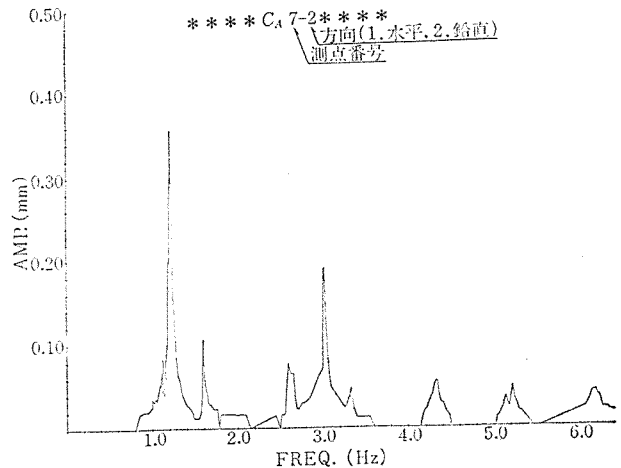


図-7 橋軸方向共振曲線 (Ca)

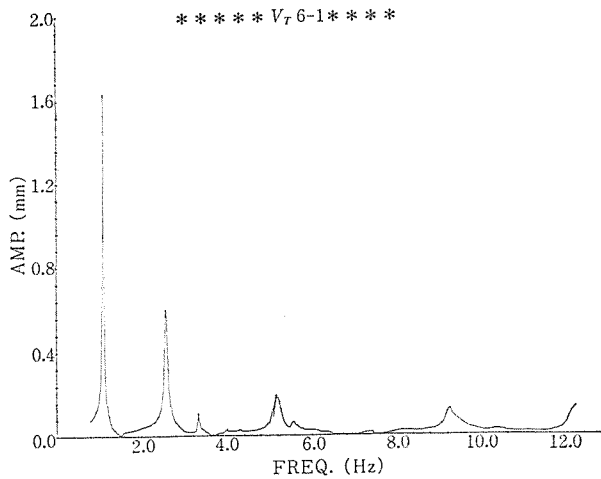


図-8 橋軸直角方向共振曲線 (V\_T)

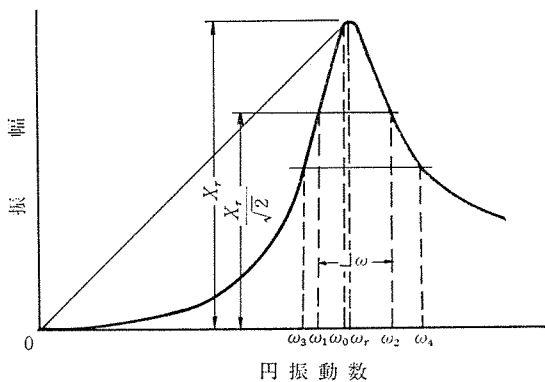


図-9 減衰定数の算出

したが、共振振動数  $\omega_r$  と固有振動数  $\omega_0$  とは異なり、固有振動数は、共振曲線に原点から接線を引けば、その接点の振動数に等しくなる。ゆえに、固有振動数は、共振振動数より常に低い値を示す。

また、共振振動数と固有振動数は式 (1) で表わされる。

$$\omega_r = \frac{\omega_0}{\sqrt{1-2h^2}} \dots \dots \dots (1)$$

實際上、今回の試験で得られた程度の減衰定数では、 $\omega_0 = \omega_r$  とみなしてよい。

4.3 減衰定数の算出

構造物の振動実験から減衰定数を算出する方法は種々あるが、今回は次の3種類の方法により、これらの比較もあわせて行った。

- ① HALF-PÖWER 法
- ② 直接法 (仮称)
- ③ 対数減衰

(1) HALF-PÖWER 法

図-9 において、最大値を与える共振時の振動数 ( $\omega_r$ ) を決める。次に、この最大値の  $1/\sqrt{2}$  (0.707) の高さで横軸に平行な線を引き、この線が曲線と交わる2点の横

表-1 減衰定数

(1) 面内 (%)						
方法 \ 次数	1	2	3	4	5	平均
HALF-PÖWER 法	1.6	0.7	1.0	0.9		1.1
振動方程式から直接求める方法	3.4	2.4	3.8	1.6		2.8
(2) 面外 クラウン部 (%)						
方法 \ 次数	1	2	3	4	5	平均
HALF-PÖWER 法	0.9	1.2			1.0	1.0
振動方程式から直接求める方法	4.6				3.8	4.2
対数減衰*	3.1 2.7	1.9 2.0	1.6	1.7	2.1	2.2
* 次数は関係なし。						
1/4 点 (%)						
方法 \ 次数	1	2	3	4	5	平均
HALF-PÖWER 法	0.9	1.3	0.5			0.9
振動方程式から直接求める方法	3.2	4.9	3.2			3.8

座標をそれぞれ  $\omega_1, \omega_2$  とし、 $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$  とすれば、 $h = \Delta\omega / (2\omega_r)$  より減衰定数の概算値が得られる。ただし、この場合、固有円振動数と共振振動数が等しいと仮定している。

この手法による結果を表-1に示す。ここで、応答倍率を計算すると、 $h=0.015$  では33となる。つまり、静的に力を作用させた場合の33倍の変位が生じる。

(2) 直接法

図-12に示すように、 $\omega_r = \omega_0$  として、共振曲線上に平行線を引き、その交点の振動数を  $\omega_3, \omega_4$  とする。減衰定数は (2) 式で与えられる。

$$h = \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\omega_3^2 + \omega_4^2}{4\omega_3^2 \cdot \omega_4^2} \cdot \omega_0^2} \dots \dots \dots (2)$$

ゆえに、共振曲線に何本かの平行線を引き、 $\omega_3, \omega_4$  を求め、上式より減衰定数を求める。結果を表-1に示す。

(3) 対数減衰<sup>5)</sup>

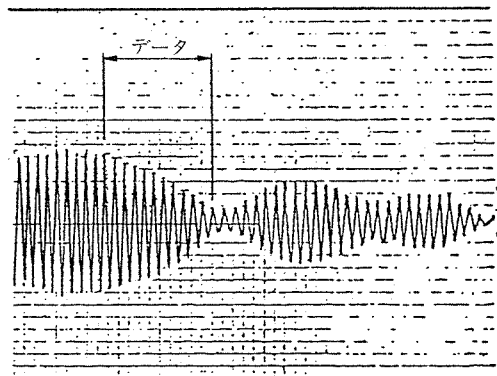
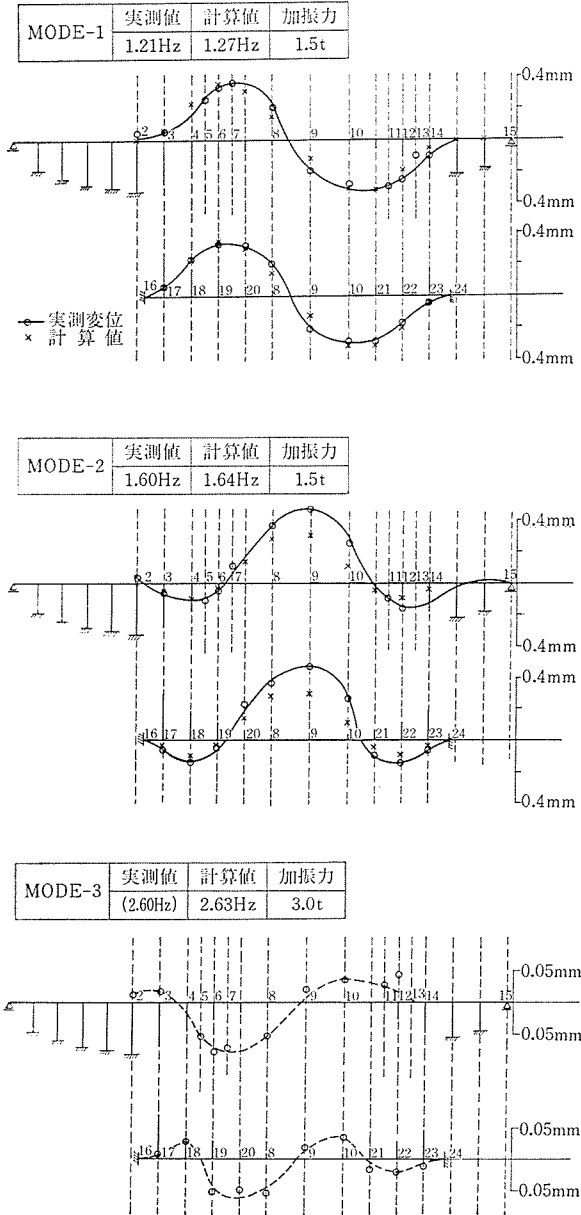


図-10 模擬自由振動波形



図—11 橋軸方向実測モード図（鉛直方向）

本橋の実験において、図—10 に示すような模擬自由振動を行った。この結果より (3) 式によって、減衰定数を求める。

$$h = \frac{1}{2\pi} \log e \frac{x_i}{x_{i+1}} \dots \dots \dots (3)$$

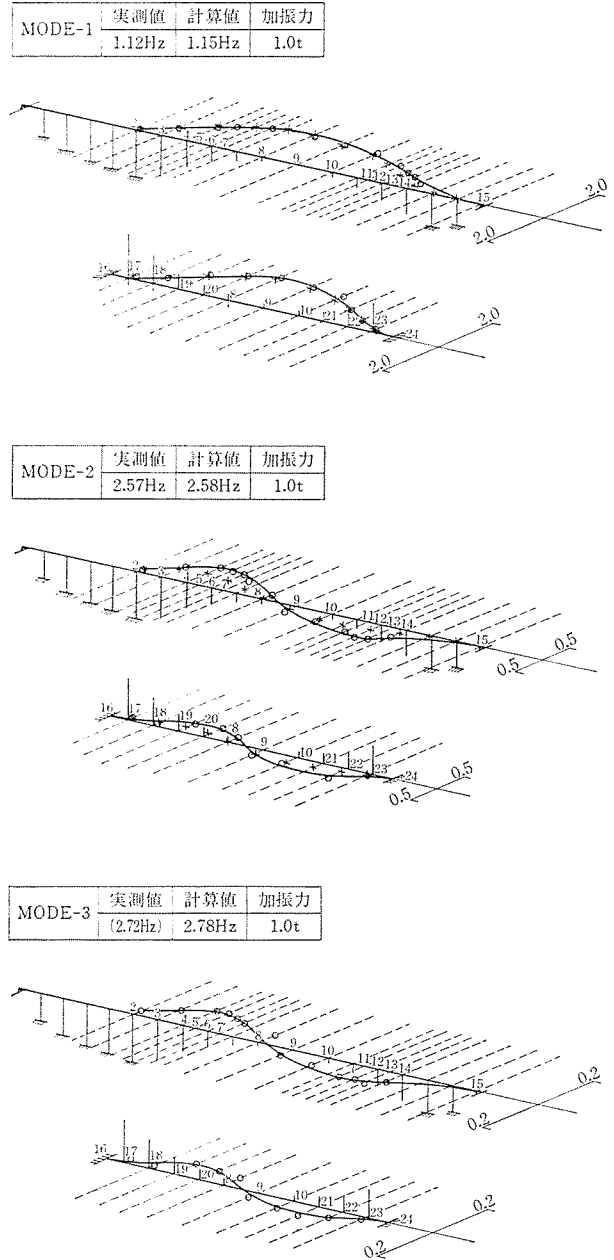
表—1 にその結果を示す。

4.4 測定変位モード

振動試験の結果から、測定変位モードを図—11、図—12 に示す。

5. 振動解析

振動実験の結果は、予備検討時の振動解析とは若干異なったものとなった。本章では、これに対し種々のモデル化を行い、振動解析上の問題点について考察する。



図—12 橋軸直角方向実測モード図（水平方向）

5.1 解析モデル

(1) 解析モデルの仮定

上部工の解析モデルを図—4 に示す。

- ① 質量としては、X, Y, Z 方向の等価集中モデルとし、回転慣性は無視した。
- ② 構造軸線は、設計計算で用いられたものとした。クラウン部の構造系は、2-タイプ考えられ、設計時も FEM 等により詳細な検討を行っているが、本解析においても図—13 に示す構造系を考慮した。
- ③ 断面諸定数は、通常の手法によったが、面外振動については、ねじり剛性を考慮した。特に、上床版のねじり剛性は図—14 に示したような断面に置き

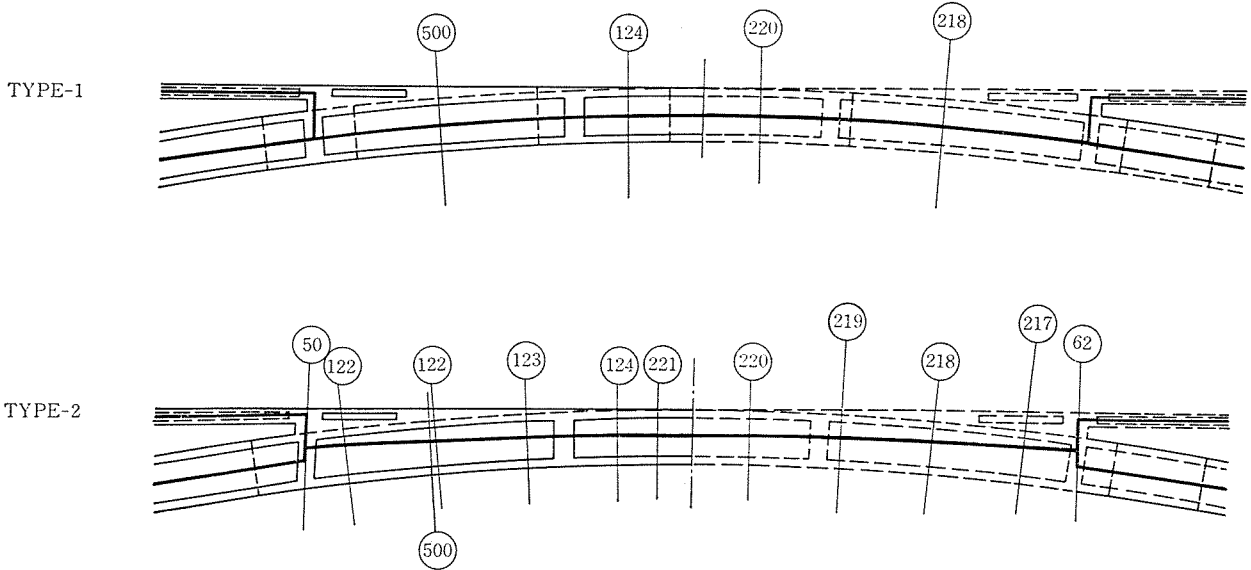


図-13 クラウン部軸線

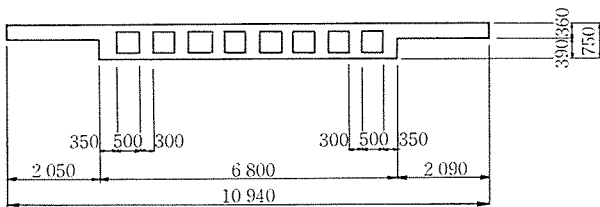


図-14 上床版ねじり定数算定モデル

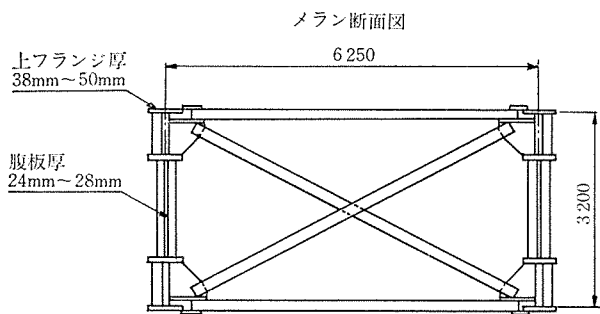
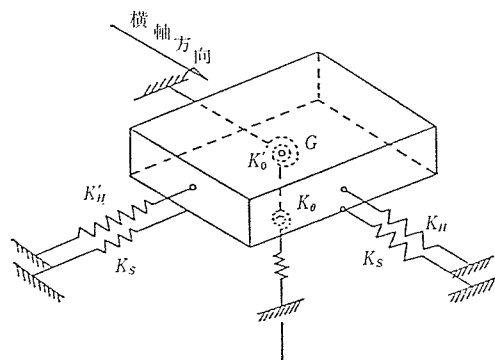


図-15 メラン断面

換えて求めた。

- ④ 本橋梁においては、アーチ部の約 1/2 はメラン材が設けられている。メラン断面を 図-15 に示す。なお、メランのヤング係数は、 $2.1 \times 10^7 \text{ t/m}^2$  とした。
- ⑤ アバットフーチングは、図-16 のごとくモデル化する。地盤バネの求め方は、山原氏<sup>9)</sup>の方法によった。
- ⑥ 振動解析は、すべての方向に対し平面モデルとした。ここで、宇佐川橋の特殊構造として 図-17 に示すようにアーチリブが一本であるのに対し、鉛直材、上床版は 2-ラインに分かれていることが掲げられる。上床版・鉛直材の面内振動モデルは、各片

$P_1 \sim P_3$  フーチング剛体モデル



$F_1, F_2$  アバット

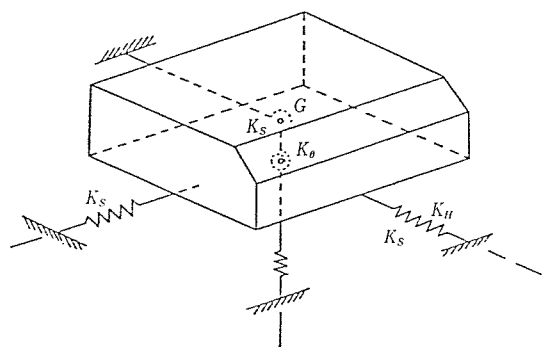


図-16 アバット・フーチングのモデル化

ラインの倍の剛性とし、面外モデルにおいては、各部材剛性を持った格点を同じ座標で格点番号を変えて設けることとした。

(2) 支持・結合条件

- 1)  $P_3$  橋脚、構造計算は、すべて平面問題として取

表-2 支持条件

支 点	1	22	23	24	25	26	101	201	36	37	18
X方向変位 (X)	M	F	F	F	F	F	F	F	F	F	M
Y方向変位 (Y)	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
Z方向変位 (Z)	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
X軸廻り回転 (Rx)	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
Y軸廻り回転 (Ry)	M	F	F	F	F	F	F	F	F	F	M
Z軸廻り回転 (Rz)	M	F	F	F	F	F	F	F	F	F	M

F : Fix (固定) M : Move (自由)

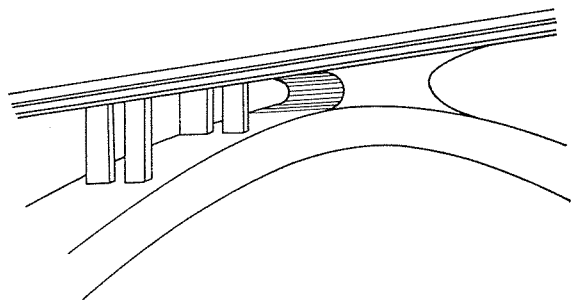


図-17 クラウン部模式図

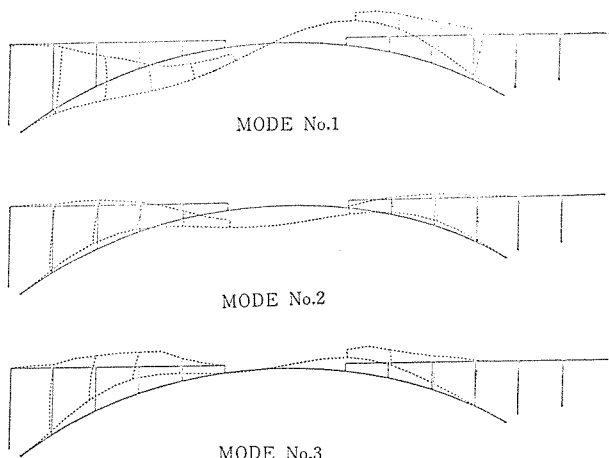


図-18 面内固有モード解析

り扱うため、アーチ上の上床版等は、一つの節点座標に2種の部材を考慮している。ただし、面内については、一本の部材で代表させるものとする。

- 2)  $V_3, V_4, V_5$  鉛直材, これらは、上下端でメナーゼ沓となっているので、部材座標系においてピン結合とする。
- 3)  $P_6, P_7$  橋脚,  $P_6, P_7$  上には可動沓が設置されているので、本解析ではこの部分を面積 $=\infty$ 、曲げ剛性 $=0$ とした部材に置き換えた。
- 4) その他の部材, 上記以外のすべての部材の結合条件は、どの方向に対しても剛結とする。

### 5.2 固有値解析

各種条件による解析結果を 表-3, 4 に示す。また、完成系の固有値解析によるモード図を 図-18, 19 に示す。

### 5.3 施工時固有値解析

#### (1) 各振動モードについて

固有値解析については、日本電子計算(株)のDYANA/FRAMEによった。本橋のような多種の部材を有する構造系では、相互の部材の連成振動が生じ、明瞭なモードが得られない場合がある。以下の考察では、特にこの点

に注意して行う。

#### 1) 面内振動

面内の固有値解析において、水平方向の振動に対しては1次と4次, 6次(解析ケースにより、次数は異なる。部材間相互の連成振動)が卓越している。これは、水平方向の有効質量が大なることにより明らかである。

図-18 から水平方向の地震に対しては、アーチリブ自体の振動モードにおいて1次, 3次, 5次のもが支配的となることがわかる。また、各々のモードの有する有効質量の割合に大きな差はない。よって、このようなアーチ橋の水平方向地震に対する検討においては、高次の振動数にも着目する必要がある。

次に鉛直方向の地震に対しては、2次と3次が支配的となる。図-18 の2次, 3次モードからわかるように、2次, 3次ともにアーチリブ自体の振動形態は2次のモードである。つまり、鉛直方向の振動に対しては、アーチ自体のモードにおいて偶数次のモードが支配的となる。

よって、本橋の場合に限っていえば、このような橋梁の設計においては、高次のモードにも十分に注意する必要がある、単純に1次モードのみに着目してはならない

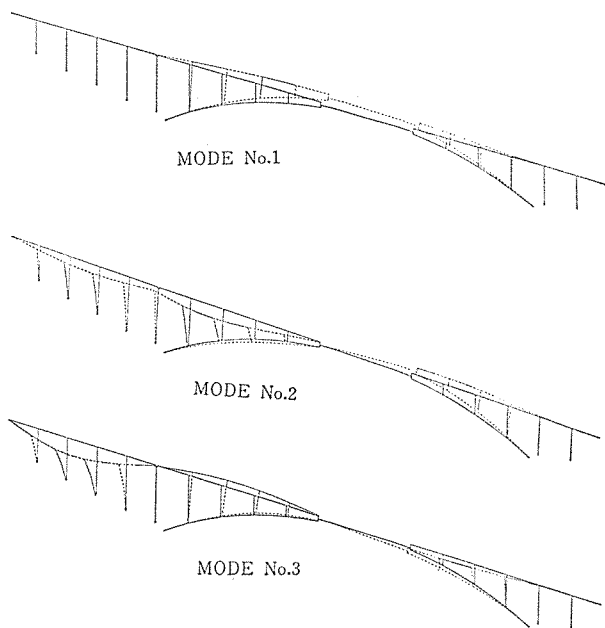


図-19 面外固有モード解析



表-3 面内固有値解析

(単位: Hz)

Case	完成時	完成時	試験時(1)	試験時(2)	試験時(3)	試験時(4)	試験時(5)	試験時(6)	試験時(7)	試験時(8)	試験時(9)	試験時(10)	試験時(11)	試験結果 (CA)
荷重	完成時	完成時	試験時	試験時	試験時	試験時	試験時	試験時	試験時	試験時	試験時	試験時	試験時	
側径間(A <sub>1</sub> ~P <sub>2</sub> )	なし	あり	なし	なし	なし	なし	なし	あり	なし	なし	なし	なし	なし	
断面性能	全断面	全断面 +メラン	全断面	全断面	全断面 +メラン	全断面 +メラン	全断面 +メラン	全断面 +メラン	全断面 +メラン	全断面 +メラン	全断面 +メラン	全断面 +メラン	全断面 +メラン	
地盤バネ	なし	あり	なし	なし	なし	なし	なし	あり	なし	なし	なし	なし	なし	
クラウン部構造系	TYPE-1	TYPE-2	TYPE-1	TYPE-2	TYPE-1	TYPE-2	TYPE-1	TYPE-2	TYPE-2	TYPE-2	TYPE-2	TYPE-2	TYPE-2	
結合条件	変更なし	変更なし	変更なし	変更なし	変更なし	変更なし	変更あり	変更なし	変更なし	変更なし	変更あり	変更なし	変更なし	
備考							メナーゼ部 剛結		X-方向質量 のみ	Y-方向質量 のみ	A <sub>2</sub> 支承以外 は全て剛結	可動部を全 て剛結とし た	掲げ越し考 慮	
1 次	0.8447	0.8859	0.8549	0.8939	0.8694	0.9054	0.9223	0.9387	1.8149	1.0252	0.9996	1.2659	0.9047	1.210
2 次	1.4656	0.9644	1.4842	1.5790	1.1521	1.6137	1.5574	1.0961	1.8956	1.6531	1.6036	1.6383	1.6162	1.600
3 次	2.4428	1.3104	2.4708	2.5234	2.5235	2.5694	2.5713	1.5636	4.3405	2.6493	2.5721	2.6392	2.5690	2.600
4 次	2.8005	1.5483	2.8337	2.9424	2.8008	2.9839	3.0274	1.8753	5.6685	3.2147	3.1200	3.1570	2.9853	3.020
5 次	3.7261	1.8909	3.8591	3.9050	3.8811	2.9870	3.9078	2.4836	6.9950	3.9166	4.1705	4.1767	3.9059	(3.870)
6 次	3.8098	2.4575	3.9194	3.9685	3.9242	3.9059	3.9655	2.8735	8.5499	4.3990	4.6544	4.6971	3.9671	(4.000)
7 次	4.1575	2.8539	4.2507	4.3691	4.2904	3.9700	4.5034	2.9606	9.5734	4.8066	4.8986	5.0714	4.3941	(4.320)
8 次	4.4441	2.9449	—	—	4.6425	4.3941	5.2379	3.5117	—	4.9033	5.2345	5.2392	4.6920	(4.680)
9 次	4.8483	3.4431	—	—	5.0569	4.6923	5.3638	3.9049	—	5.2840	5.5039	5.8262	5.1500	(5.140)
10 次	5.0403	3.7363	—	—	5.2754	5.1516	5.6119	3.9745	—	5.4594	5.8206	6.0044	5.2815	(5.220)

表-4 面外固有値解析

(単位: Hz)

Case	完成時	完成時	試験時(1)	試験時(2)	試験時(3)	試験時(4)	試験時(5)	試験時(6)	試験時(7)	試験時(8)	試験時(9)	試験結果 (CT)	試験結果 (VT)
荷重	完成時	完成時	試験時	試験時	試験時	試験時	試験時	試験時	試験時	試験時	試験時		
側径間(A <sub>1</sub> ~P <sub>2</sub> )	なし	あり	なし	なし	なし	なし	あり	あり	あり	あり	あり		
断面性能	全断面	全断面 +メラン	全断面	全断面	全断面 +メラン	全断面 +メラン	全断面	全断面	全断面 +メラン	全断面 +メラン	全断面 +メラン		
地盤バネ	なし	あり	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	あり		
クラウン部構造系	TYPE-1	TYPE-2	TYPE-1	TYPE-2	TYPE-1	TYPE-2	TYPE-1	TYPE-2	TYPE-1	TYPE-2	TYPE-2		
結合条件	変更なし	変更なし	変更なし	変更なし	変更なし	変更なし	変更なし	変更なし	変更なし	変更なし	変更なし		
備考													
1 次	1.1557	1.1359	1.1741	1.1845	1.1847	1.1924	1.1720	1.1863	1.1901	1.1953	1.1530	1.120	1.120
2 次	2.6353	2.5040	2.6988	2.7701	2.7278	2.7947	2.7046	2.7770	2.7386	2.8012	2.5586	(2.580)	2.570
3 次	4.0640	2.7211	4.1636	4.2494	4.2326	4.3072	3.5381	3.5383	3.5383	3.5386	2.7832	(3.300)	3.330
4 次	5.8821	3.5117	6.0767	6.0800	6.0789	6.0802	3.6122	3.6123	3.6123	3.6124	3.6037	(3.800)	3.800
5 次	5.9957	3.9028	6.1451	6.3722	6.2256	6.4410	4.1804	4.2679	4.2521	4.3296	3.9793	4.300	4.310
6 次	7.2021	4.7001	7.2966	7.3563	7.3258	7.3798	5.9699	6.1012	6.0187	6.1317	4.7855	(6.400)	(5.200)
7 次	8.3337	5.8172	8.4228	8.3858	8.5081	8.4557	6.1502	6.1502	6.1502	6.1501	5.9061	(7.400)	(6.000)
8 次	9.4368	5.9492	9.6641	9.9965	9.7582	10.0798	6.6031	6.7353	6.6563	6.7901	6.1514	(7.500)	(7.320)
9 次	10.9106	6.7914	11.2216	11.2282	11.2236	11.2294	7.6353	7.6355	7.6356	7.6356	6.8856	(8.300)	(7.340)
10 次	11.9183	7.1558	12.3384	12.3424	12.3424	12.3459	8.2567	8.2700	8.2701	8.2887	7.2976	(9.000)	8.100

といえるのではなからうか。

2) 面外振動

面外の固有値解析においては、1 次のモードが全有効質量の大部分を占める。よって、面外の検討では、ほぼ1次のみに着目して解析してよいと思われる(図-19参照)。

(2) モード次数と周期の関係

図-20 に、モード次数と周期の関係を示す。これから、面内振動においては、支承部を固定とした Case-10 と実験値が比較的一致しているのが読みとれる。また、面外の低次モードでは、地盤バネを考慮した Case-9 がよく合うようである。

既往の研究でも問題とされているように、面内振動において実橋の支承条件が解析上のそれとは多少異なり、解析仮定どおり動いていないことがこれからわかる。このように面内振動においては、部材の支持条件が実橋の振動性状に大きな影響を与えると思われるが、以下に各種条件による解析結果の比較を行う。

(3) 回転慣性<sup>3)</sup>

本解析では、回転慣性は基礎部(フーチングアバット)についてのみ考慮した。ここでは、各節点に回転慣性を考慮した場合の固有値解析上の差をみた。なお検討構造系は A<sub>1</sub> 側径間部(B-Line, A<sub>1</sub>~P<sub>5</sub>)とした。

回転慣性は(4)式により算出した。

$$J = \int_0^{\Delta x} \frac{w}{g} dx = \frac{w}{g} I_{\text{mean}} \cdot \Delta x \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 J: 回転慣性モーメント (t・m・sec<sup>2</sup>)  
 w: 単位重量 (t/m<sup>3</sup>)  
 g: 重量加速度 (m/sec<sup>2</sup>)

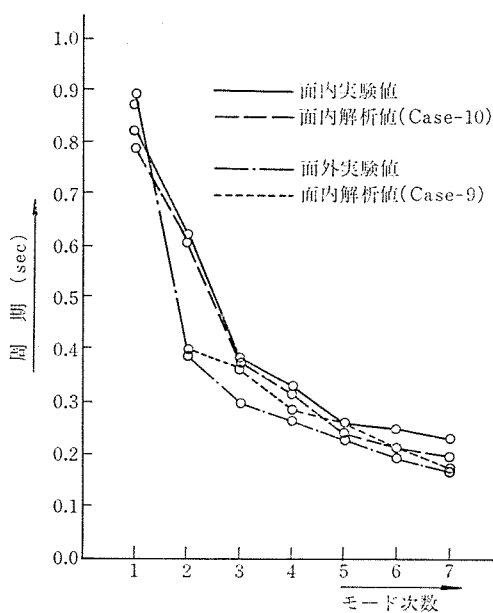


図-20 モード次数と固有周期の関係

$I_{\text{mean}}$ : 平均断面 2 次モーメント (m<sup>4</sup>)  
 $\Delta x$ : 長さ (m)

解析結果を表-5 に示す。このように、回転慣性を考慮すると、固有振動数は全体的に低くなる傾向があるが、値的にはそれほど大きなものとならないので、無視してもよいと思われる。

表-5 回転慣性考慮による固有振動数 (解析結果) (単位: Hz)

項目 Mode	回転慣性 無視	回転慣性 考慮
1	1.0197	1.0195
2	3.4789	3.4772
3	4.4474	4.4447
4	5.5617	5.5569
5	6.5986	6.5919

(4) アーチ部材の軸力

アーチ部材に軸力を考慮した場合の固有値解析を行う。質点系はアーチリブのみとし、軸力を順次変え固有値を求める。解析式は、次の4タイプとする。

- ① TYPE-1 (軸力比 0.0)
- ② TYPE-2 ( " 0.5)
- ③ TYPE-3 ( " 1.0)
- ④ TYPE-4 ( " 1.5)

ここに、軸力比 =  $\frac{\text{導入した軸力}}{\text{完成系全死荷重時軸力}}$

とする。

結果は、軸力と固有周期のみに着目して 図-21 に示す。総体的に、軸力が増すに従って固有周期が低下する傾向があるが、この理由については、幾何剛性について述べられた文献を参照されたい。

(5) 揚げ越しによる振動性状への影響

本橋は、橋体完成後のクリープ・乾燥収縮による軸線の変化を考慮して揚げ越しを行っている。振動試験実施時においては、まだその影響がクラウン部で +100 mm

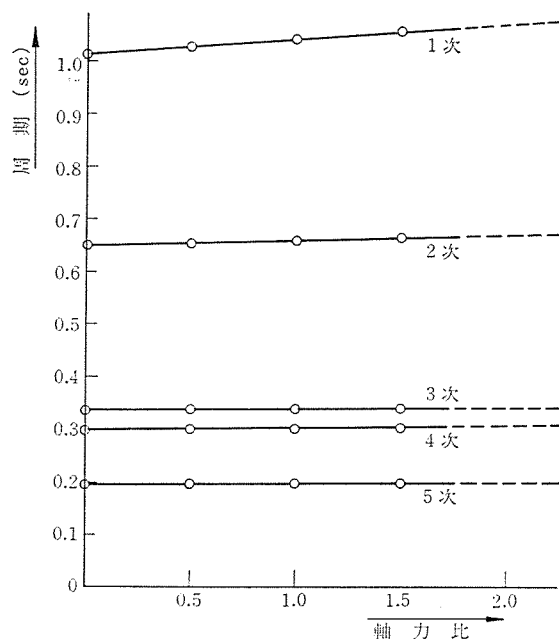


図-21 軸力と固有周期の関係

程度残っている。よって、この軸線の移動を考慮して固有値解析を行った。その結果、全体として固有周期が若干長くなるのがわかったが、殆んど無視できる程度の値である(表-3 参照)。

(6) クラウン部構造系の差について

クラウン部構造系を2タイプ考えて解析したが、固有値解析上では、TYPE-2の方がTYPE-1よりも面内・面外とも固有周期が短くなっている。面内で5%, 面外で1%程度であり、面外振動に対しては殆んど影響がない。振動モードの面から見るとTYPE-2のクラウン部の変位モードが小さくなり、その他の部分は大きくなっている。モードの形状は殆んど変わらず、今回の実験からはどちらのタイプが実橋に近いかは判断できなかった。この点については文献1)を参考にさせていただきたい。

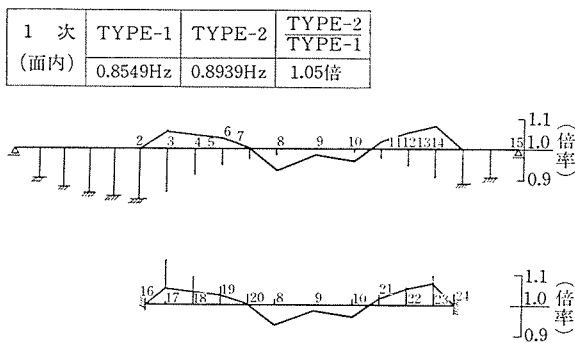


図-22 クラウン部構造系の違いによるモードの変化 (TYPE-2/TYPE-1)

(7) メラン断面の考慮について

アーチリブの剛性にメラン断面を加味した場合、次のことが言える。

固有周期が1%程度短くなり、クラウン部の変位モードが小さくなる。また、その他の部分の変位モードは若干増加している。

(8) 支持条件・結合について

アーチ橋の振動実験において、常に問題となるのは面内振動における各部材の支持条件、結合条件である<sup>6),7)</sup>。

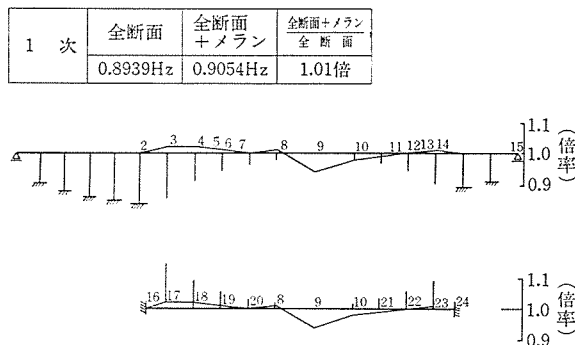


図-23 メラン断面の考慮によるモードの変化 ([全断面+メラン]/全断面)

ここでは、これらの条件を種々変更して固有値解析を行った。

その結果、2次以上の固有値変化は殆んどないが、1次の固有振動数はかなり変わる。その模式図を図-24に示すが、実験値はすべての滑動部を固定としたものと殆んど近いものとなった。

表-6 BP 沓の摩擦係数

鉛直圧力	355 kg/cm <sup>2</sup>	
繰返し速度	6 mm/sec	15 mm/sec
始動摩擦	0.076	0.083
安定摩擦	0.067	0.070

特に、A<sub>2</sub> 支承の固定が大きく影響する。BP 沓の場合、実際の摩擦係数は表-6の程度と考えられるので、約 70 gal 以

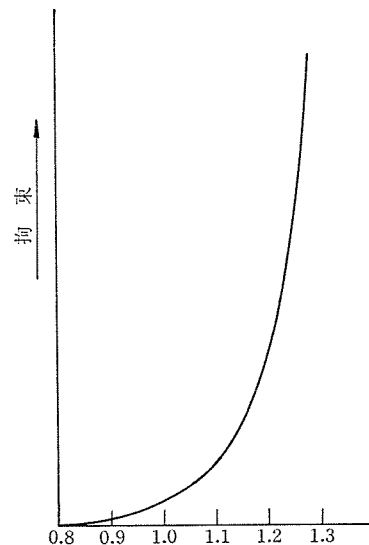


図-24 支持条件、結合条件の拘束による1次固有振動数の変化模式図

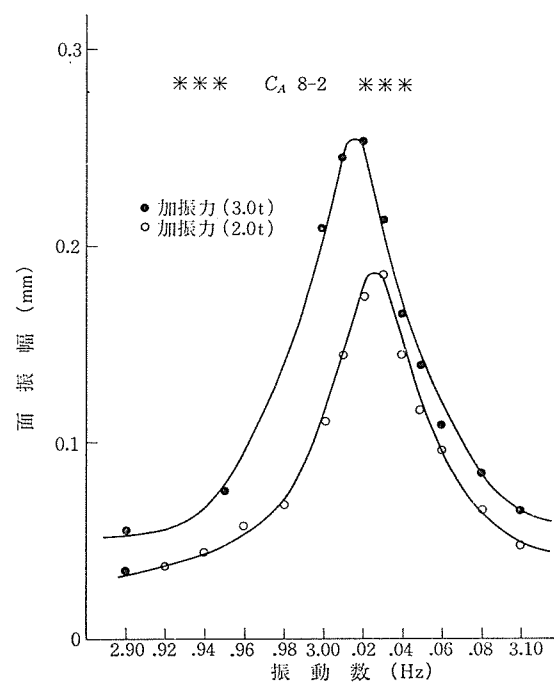


図-25 加振力上昇に伴う共振曲線の変化

上の加速度が作用しないと設計仮定どおりの動きをしないと考えられる。今回の振動試験では 10 gal 未満程度の加速度しか得られないので、滑動条件を無視した解析結果とほぼ等しくなったと思われる。図-25 に加振力上昇に伴う共振曲線の変化を示す。

結合条件では、メナーゼ沓の場合、計算仮定上のピン構造としてよりは何らかの回転バネ支承とした方が実情に合うようである。

5.4 地震応答解析

地震応答解析については、参考文献 1) で既に述べられているので、ここではこれについて若干の考察を述べる程度とする。上記文献でも述べられているように、土研応答スペクトル (1970, 1 種地盤) による動的解析の値 ( $h=0.02$ ) が静的解析の値を上回っている。これは、修正震度法による補正係数が 1.25 までであるのに対し、土研スペクトルの応答加速度倍率が周期 1 sec 以下の場合 1.25 以上 ( $h=0.05$  以下) となるためと思われる。また、同文献より静的解析の結果は動的解析 ( $h=0.05$ ) の結果とほぼ等しいことがわかる。減衰定数のとり方については、道路橋示方書・耐震設計編でも詳細に述べられているが、今回の実験の範囲では 0.015 という値が得られた。強震時においては、材料の履歴減衰等も考慮しなければならないので、当然これより大きな減衰定数が想定できる。今回の結論として、減衰定数を 0.02 としても、構造物の安全性は確認されたということができよう。

6. 他橋梁との比較

同形式の橋梁としては、外津橋 (佐賀県)、帝釈橋 (中国自動車道) がある。これらの橋梁で共通しているのは、水平方向の拘束度が面内の振動性状に対して大きな影響を与えるということである。面外に対しては、比較的計算結果と実験結果は一致する。

水平方向の拘束は、強震時には理論解に一致するとして、ライズ/スパンによる固有周期の変化を 図-26<sup>6),7),8)</sup> に示す。傾向的には、他橋梁との違いは見受けられない。本橋の場合、長大スパンの割には、ライズが小さいため、面内の振動性状は中規模橋梁のものと似かよっている。面外においてもこのことは傾向的に見られ、帝釈橋とほぼ同程度の曲線を描いている。

過去の振動実験から得られた減衰定数を 表-7<sup>9),7)</sup> に示す。全体的に見て、高次になるほど減衰定数は小さくなっているが、これは外部粘性減衰の影響が強く出ているためであろうか。内部減衰と外部減衰の関係を下式に示す。

$$h_s = \frac{1}{2} \left( \frac{r_e}{\omega_s} + \omega_s r_i \right) \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 $r_i$  : 内部減衰に対する係数

$r_e$  : 外部減衰に対する係数

表-7 アーチ橋の振動実験による減衰定数

(単位: %)

橋梁名	面内振動			面外振動		
	1次	2次	3次	1次	2次	3次
宇佐川橋	1.6	0.7	1.0	0.9	1.3	0.5
帝釈橋	1.5	0.8	0.7	1.2	0.7	0.7
外津橋	1.4	1.3	0.6	1.5	0.7	0.5

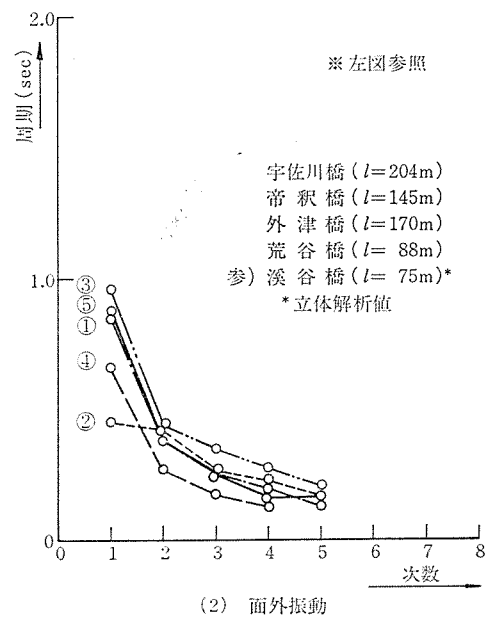
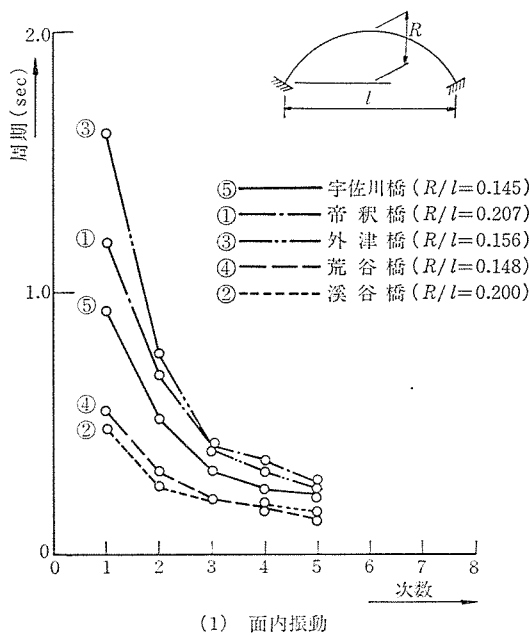


図-26 ライズ/スパン比による固有周期の変化

となる。減衰定数  $h_s$  は、外部粘性減衰の場合、 $\omega_s$  が大きくなるほど、つまり、高次振動になるほど小さくなる。

試験で得られる減衰定数は、1.5% 前後が限度と判断すると、強震時においては履歴等を考慮して2% 以上は見込めるのではなからうか。

## 7. 結 論

実験は、起振機による強制振動のみによったが、共振曲線、減衰定数は充分の精度で得られた。

- ① 解析モデルは、すべて平面モデルとして解いたが、実験値と比較しても満足のものであった。
- ② 各種条件（軸線、メラン剛性、軸力、回転慣性、揚げ越し等）の固有値に与える影響は微少であり、許容できる程度である。ただし、部材の支持条件（地盤バネ、沓の摩擦）、結合条件（メナーゼ沓等）は、面内、面外の振動に対してかなり影響を与えることもあるので、充分注意する必要がある。
- ③ 面内振動において、アーチ自体の奇数次モードは水平振動に大きく作用し、偶数次モードは鉛直振動に大きく作用する。同じく面内振動においては、支配的なモード次数は高次にわたるが、面外振動においては、1次モードが支配的となる。
- ④ 減衰定数の算出は、今回のような現場実験の場合 HALF-POWER 法によるのが最も良いと思われる。

## 8. あとがき

以上、長大コンクリートアーチ橋の振動特性につい

て、今回得られた資料をもとに述べた。今後の予定としては、他橋梁との比較をもう少し詳しく行い、アーチ橋の振動特性をより明確なものとしたい。また、振動実験は本橋も含め過去多くの橋梁で行われているが、常にその加振力の微小なことと観測値の小ささから、実際の挙動を示していないということが問題点として残っている。今後の振動実験は、完成時における構造物の確認試験的に行うか、あるいは強震状態まで振動させなければ大きな進展が望めないのではなからうか。

振動実験にあたって、お世話になりました関係各位の皆様へ紙面をお借りして衷心よりお礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) 内田道雄ほか：中国縦貫道 宇佐川橋上部工の設計・施工、プレストレストコンクリート、Vol. 24, No. 3, pp. 58~67, プレストレストコンクリート技術協会, 1982年5月
- 2) 内田道雄ほか：宇佐川橋の施工、橋梁と基礎, Vol. 16, No. 7, pp. 1~7, 建設図書, 1982年7月
- 3) 小坪清真：土木振動学, 森北出版, 1977年3月
- 4) 小高昭夫ほか：耐震・耐風構造, 鹿島出版会, 1971年6月
- 5) 志賀敏男：構造物の振動, 共立出版, 1978年6月
- 6) 宮崎雄二郎ほか：外津橋の振動性状測定とその理論的考察, 橋梁と基礎, Vol. 9, No. 4, pp. 14~20, 建設図書, 1975年4月
- 7) 日本道路公団：中国自動車道 帝釈川橋振動試験報告書, 日本道路公団, 1979年1月
- 8) 安部勇ほか：けい(溪)谷橋(RCアーチ橋)の動的解析, 奥村組技術研究年報, 第7号, pp. 75~88, 奥村組技術研究所, 1981年8月
- 9) 山原 浩：動的解析における地盤の考え方, 土と基礎, Vol. 19, No. 8, pp. 7~16, 土質工学会, 1971年8月

## ◀刊行物案内▶

### 穴あき PC 板設計施工指針・同解説

- 体 裁：B5判 128頁 ビニール製の表紙で現場持ち歩きに便利  
 定 価：1800円（会員特価：1600円） 送 料：450円  
 内 容：1. 総則 2. 材料および許容応力度 3. 部材の設計 4. 構造設計  
 5. 接合部の設計 6. 施工（含取付・補修等）  
 お申込みは代金を添えて、(社)プレストレストコンクリート技術協会へ