

# 安治川橋梁の耐震設計

工 務 部 江 見 晋  
大阪第三建設部 設計課 林 秀 侃

## はじめに

安治川橋梁は、湾岸線（Ⅱ期）が既に供用中の港大橋から北進し、安治川を渡河する地点に架けられる  $120\text{ m} + 350\text{ m} + 170\text{ m}$  の非対称3径間連続斜張橋である。1)（図-2）、本橋は桁下空間

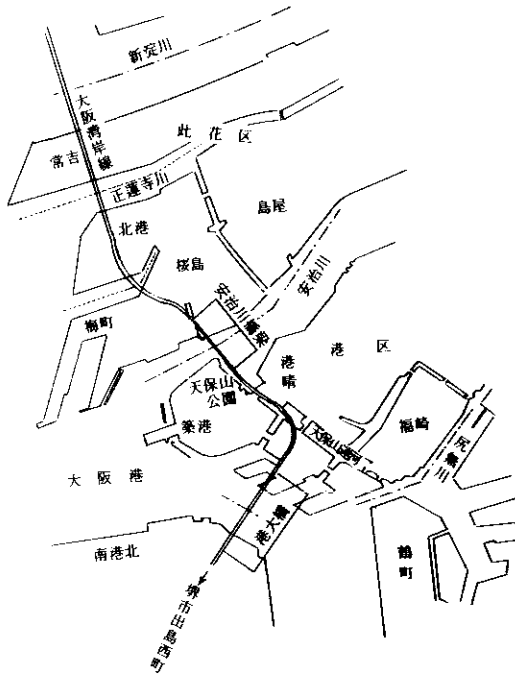


図-1 位置図

が約  $50\text{ m}$  と非常に高くなるため、塔は基礎工から立ち上げた塔形式を採用した。また、地震力をとる固定脚は両中間橋脚とした。基礎工は大口徑（ $\phi = 2\text{ m}$ ）の場所打杭基礎としているが、架橋地点の地盤は、上層約  $30\text{ m}$  は軟弱な沖積層であり、支持層とする砂礫層は約  $10\text{ m}$  と比較的薄い。

本報告は、安治川橋梁上部工の耐震設計について述べたものであり、安治川橋梁の耐震設計の手法を示し、また斜張橋の地震応答特性を明らかにした。本橋の耐震設計の手法は、応答スペクトル法による動的解析によるものとしているが、動的解析に用いる設計地震入力、架橋地点の地盤特性、地盤と構造物の動的相互作用の効果を取り入れた安治川橋梁独自の応答加速度スペクトル曲線を採用した。また、本設計手法を用いた地震応答解析より斜張橋全体の地震応答特性を明らかにし、この結果を用いた断面算定を示した。

## 1. 耐震設計の基本方針

本橋は前述したようにフレキシブル塔を有する斜張橋であり、特に橋軸方向に対しては1次の固有周期が約  $4.0$  秒とかなりの長周期構造物である。したがって、震度法による静的な耐震設計は合理的でなく、構造物の動的特性を考慮した耐震設計が必要である。

動的な影響を考慮した耐震設計法としては、応答を考慮した修正震度法または動的解析が考えられる。斜張橋は塔、主桁、ケーブルの各部分から成り立っており、各々の構造の応答が卓越する固有周期は異なり、しかも高次となる場合もあるため、応答を考慮した修正震度法を適用するにしても、卓越周期の算定に応答解析を必要とすることから、その作業は動的解析による設計と大差がない。したがって、本橋の耐震設計法はその設計手法に問題があるとしても、事実上忠実な手法である動的解析によるのを基本とした。

動的解析としては、計算の便宜を考え応答スペクトル法によるのを原則とし、必要に応じて特定

の地震記録を用いた時刻歴応答解析を行うものとした。

地震時における構造物の挙動は、周辺地盤の影響を大きく受けるため、構造物の耐震性は地盤との相互作用としてとらえることが必要である。本橋においては、この問題に対処するため有限要素法を適用した。しかし、本橋のように上部構造物が長大化、複雑化してくると自由度数が非常に大きくなり、地盤-基礎-上部構造全体系の動的解析を一挙に行うことは非常に困難となる。したがって本橋においては、上部構造物については簡易モデルとして有限要素法による解析を行い、基礎構造物の応答波形より応答スペクトル図を作成するものとした。この応答スペクトルを用い、下部完全固定系として上部構造物の応答解析を行い、応答値を評価するものとした。

## 2 動的解析に用いる応答加速度スペクトル

本橋の動的解析に用いる応答加速度スペクトルの算出方法を図-2に示す。本手法の特長は、地盤-構造物の動的相互作用の効果をとり入れたことにある。まず、入力地震波を設定し実施した室

内試験のひずみ-せん断弾性係数曲線、ひずみ-減衰定数曲線の結果を用いて重複反射理論による応答計算から、地震時のひずみレベルに対応する地盤定数、応答加速度を求めた。次に、上部構造を含む杭基礎-地盤系をモデル化し、上記の地盤定数を用いて有限要素法により時刻歴応答解析を行い、基礎構造物フーチング天端の加速度応答スペクトルを求めた。これより設計用応答加速度スペクトルを作成した。

以下に、図-3のフローチャートに従いこの手法について詳述する。

### 2-1 地震入力

解析に用いる地震入力波形としては次の2つを用いるものとした。

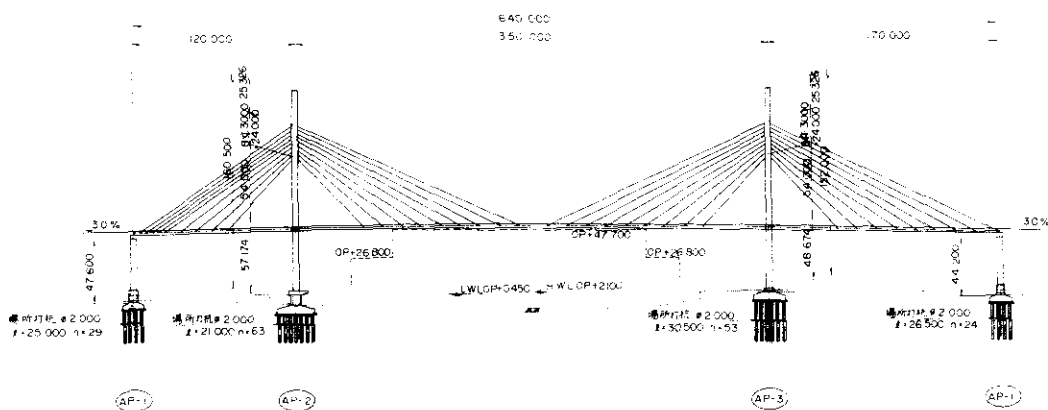
(1) Taft USA N21E 1952.7.21

$M = 7.7$        $\Delta = 64 \text{ Km}$

(2) 大阪南港

$M = 5.8 \sim 5.9$        $\Delta = \text{約 } 90 \text{ Km}$

このうちTaft地震は、洪積地盤で観測された代表的な強震記録である。また、大阪南港地震は表-1に示すように最大加速度10数galの小規模な地震であるが、架橋地点付近で記録された地震波形であり、架橋地点の地盤特性を反映したものと考えられる。



安治川橋梁 一般図

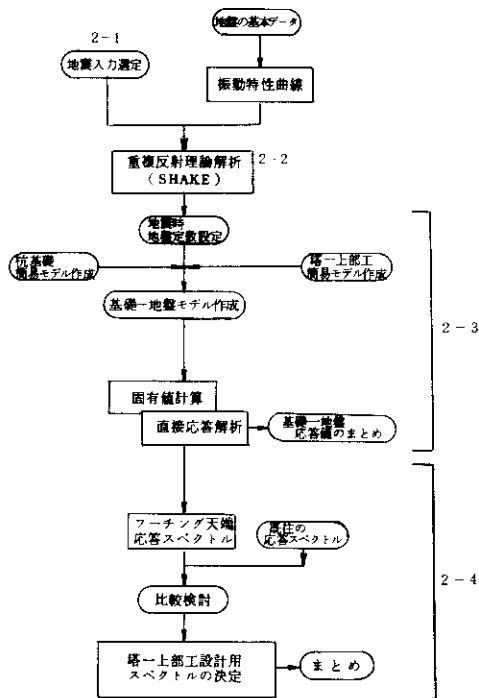


図-3 応答加速度スペクトル算出方法

南港地震波形は、深さ方向に異なる3地点で観測されたものであり、これを安治川橋梁架橋地点の耐震設計上の基盤での波形として用いるための補正が必要である。その解析手法を図-4に示す。波形記録自体の伝達関数、相互相関関数、および観測地点のP.S検層結果、地盤の伝達関数等からこの地点の地質、物理定数を定め、これより一次元地盤モデルによる重複反射理論により安治川基礎相当層の入射波を作成した。図-5に南港地点、安治川架橋地点の地質データを示す。

### 2-2 重複反射理論による解析<sup>2)</sup>

地震時のひずみレベルに対応する地盤定数、応答加速度を求めるために、室内試験のひずみ-せん断弾性係数曲線、ひずみ-減衰定数曲線の結果を用いて一次元地盤モデルによる重複反射理論解析を行った。地震基盤としては、洪積層N値50以上、S波速度300m/s以上のいわゆる工学的支持層<sup>3)</sup>ということで、第2砂礫層(GL-53m)とした。また、入射加速度は100galとした。これは耐震設計上の基盤(洪積層第2種)が露頭しているとした場合の200galに相当する。

表-1 南港地震記録

地震発生 年月日時分	震 央		深度 H (m)	M	最大加速度 (Gal)											
	震源地	緯度経度			地表面			-20m			-40m			-80m		
					UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW
1973.5.12 23:08	兵庫県 西部	35° 134° 01' 30'	0	4.1	1.9	1.9	2.3	-	-	-	0.6	1.5	1.3	0.8	1.3	1.2
1973.11.25 13:25	和歌山 県中部	33° 135° 51' 25'	60	5.9	6.5	13.3	10.0	-	-	-	2.9	5.8	4.3	3.0	1.4	4.4
1973.11.25 18:19	和歌山 県中部	33° 135° 53' 23'	60	5.8	6.9	14.6	17.4	-	-	-	3.6	6.4	7.0	3.6	4.5	4.3
1974.12.6 20:58	和歌山 県中部	34° 135° 0' 4'	40		3.0	3.7	3.1	1.7	3.6	2.8	1.2	2.1	2.3	1.2	1.8	2.3
1974.11.8 13:03	兵庫県 南東部	34° 135° 46' 5'	10	4.1	3.0	4.8	2.7	1.2	3.1	2.8	1.1	2.3	1.2	1.0	1.8	1.2

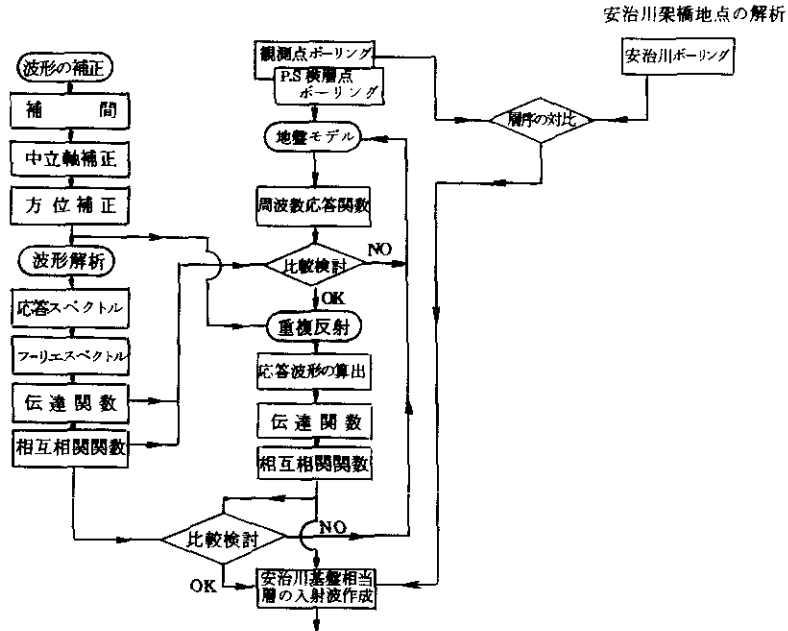


図-4 南港地震記録の解析手法

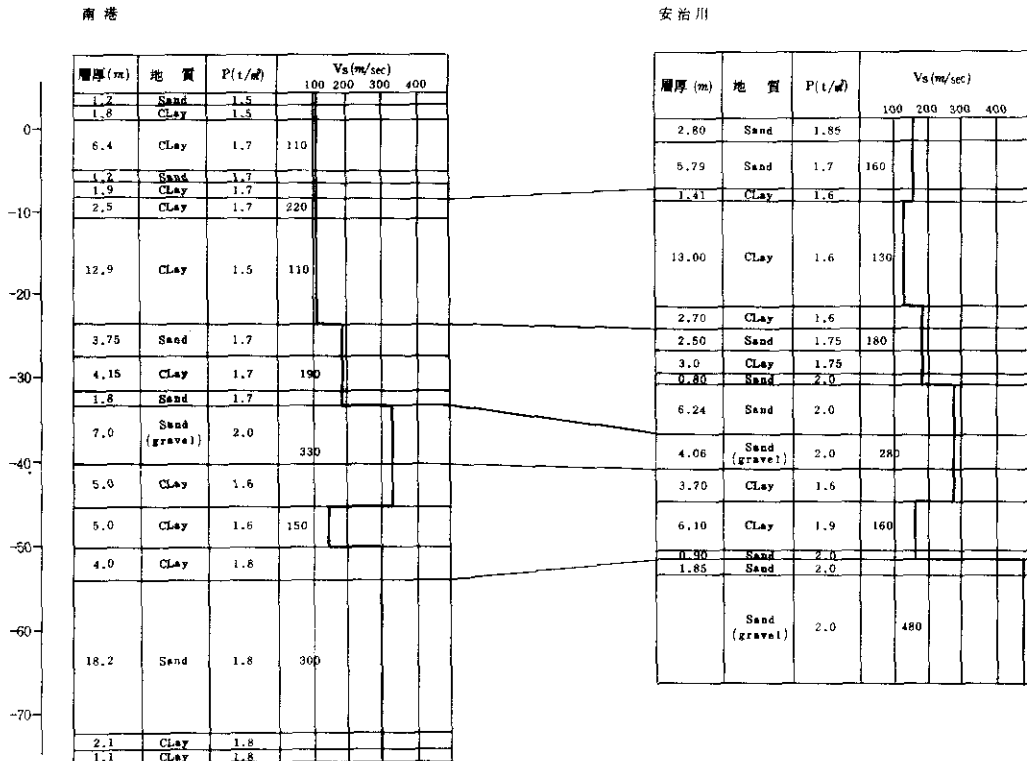


図-5 地質データ

解析に用いた地盤モデルと解析結果を図-6に示す。また、数値解析に用いたプログラム SHAKE の概略フローチャートを図-7に、モデル地盤の特性を示す  $G-\gamma$ 、 $\beta-\gamma$  曲線を図-8、9に示す。図-6の加速度分布において、各地震波とも同じ傾向を示すが、その値は同じ南港地震においてもかなり異なる。Taft 地震における地表面での加速度は約 180 gal である。

### 2-3 有限要素法による地震応答解析

前記の重複反射理論解析で地震基盤に相当する地層での加速度（入射波+反射波）が得られたので、これを用いて、上部工を含む杭基礎-地盤系を図-10、11に示すような有限要素法による解析モデル化し、前項で求めた地盤定数をインプットして時刻歴応答解析を行った。この際、上部

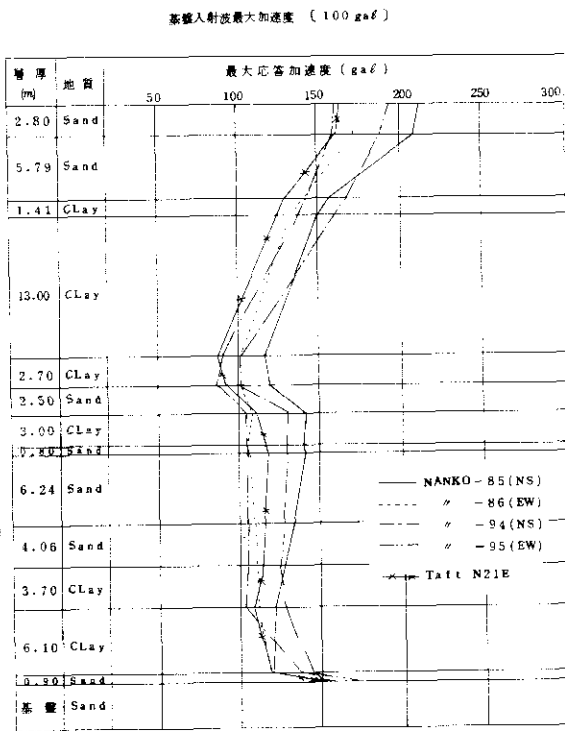


図-6 安治川地盤モデルにおける最大加速度分布

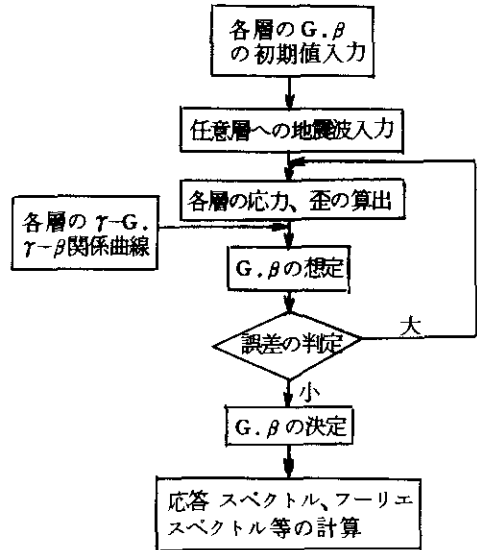


図-7 "SHAKE" の解析フローチャート

工は塔のみをモデル化し、桁部の影響は上部工全体の振動解析の結果、等価質量比を求めて考慮した。

本橋の基礎工形式は場所打杭 ( $\phi 2.0 m$ ) であり橋軸方向 6 本、橋軸直角方向 9 本は各々列数でモデル化した。また、基盤での入力加速度は図-6

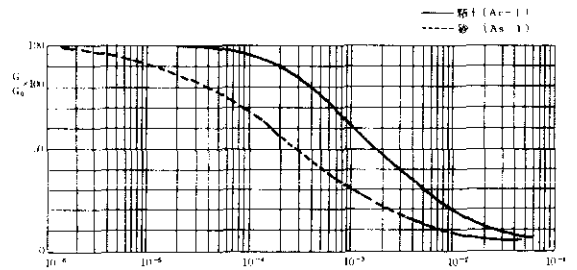


図-8  $G-\gamma$  曲線

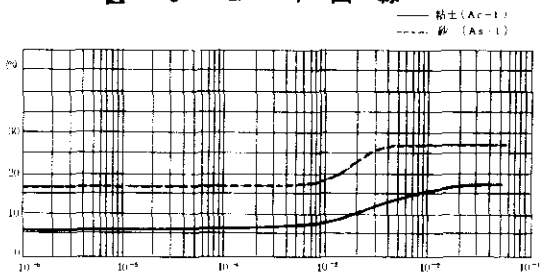


図-9  $\beta-\gamma$  曲線

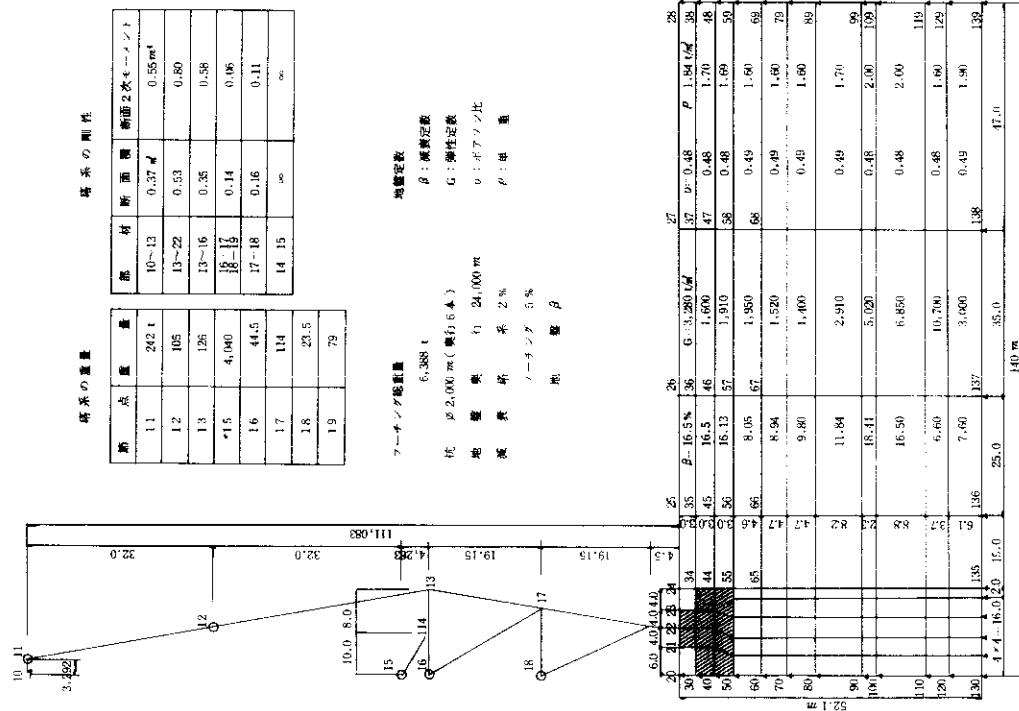


図-10 橋軸直角方向振動モデル

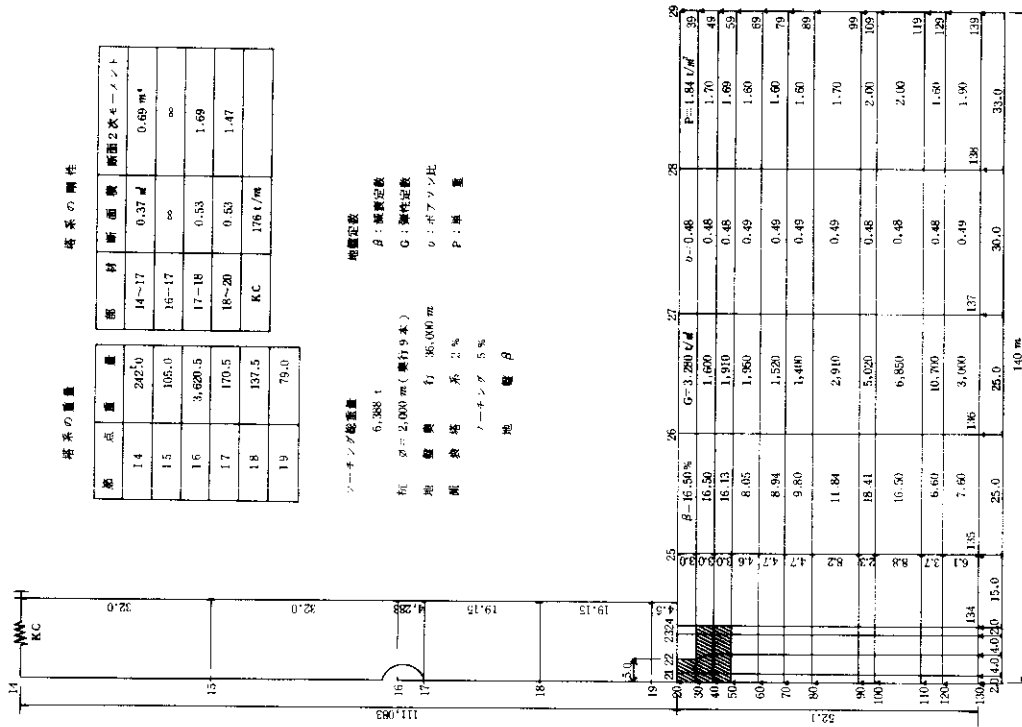


図-11 橋軸方向振動モデル

の重複反射理論解析の結果、Taft地震の場合は180 gal、南港地震の場合は190 galとした。減衰は内部減衰のほかにモデル境界での減衰も考慮した。

解析は橋軸方向、橋軸直角方向各々について行い、フーチング天端での水平加速度、回転加速度の応答スペクトルを求めた。

Taftおよび南港地震による入射波形の加速度応答スペクトルおよびフーチング天端での水平加速度応答スペクトルを図-12、13、14に示す。

### 2-4 設計用加速度応答スペクトル

図-13、14に示すフーチング天端での加速度応答スペクトル曲線においては、Taft地震、南港地震とも1秒前後に卓越周期をもっている。常時微動の卓越周期、地盤だけのモデルの有限要素法による解析においても1秒前後に卓越周期がみられることより、これはこの地域の地盤特性が現われているものと考えられる。したがって、設計用スペクトルを作成するにあたっては出来るだけその特

性を生かすものとした。図-15、16に本設計用スペクトル曲線を示す。図中、Taft地震、南港地震とともに道示V耐震設計編の4種地盤のスペクトルを参考として示した。設計用スペクトルとして橋軸方向、直角方向とも大した差がないので同じスペクトルとした。また最大値を400 galとしたのは次の工学的判断によるものである。

上記の解析は理想的な弾性体としての解析であるが実際の構造物、地盤は非弾性的な挙動を示すものであり、これを考慮すると応答値は低下すると予想される。

図-15、16は図-13、14で減衰定数を2%としたものに相当するが、大地震において相当の変位をしたときの減衰は上記理由にもよりにかなり大きくなると予想される。また、南港地震による応答スペクトルはかなり大きくなっているが、これは数10 galの地震によるものであり、強震に対するスペクトルはこれより低下する傾向にある。

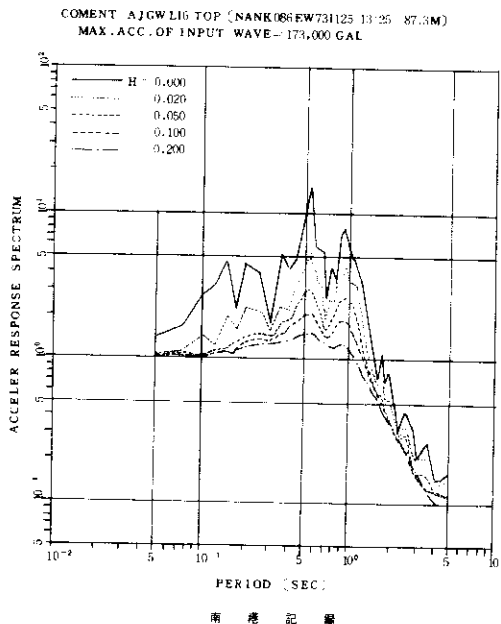
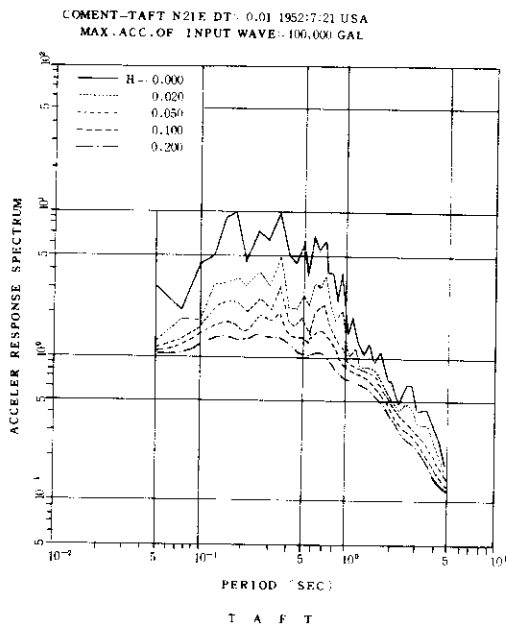


図-12 入射波形の加速度応答スペクトル倍率

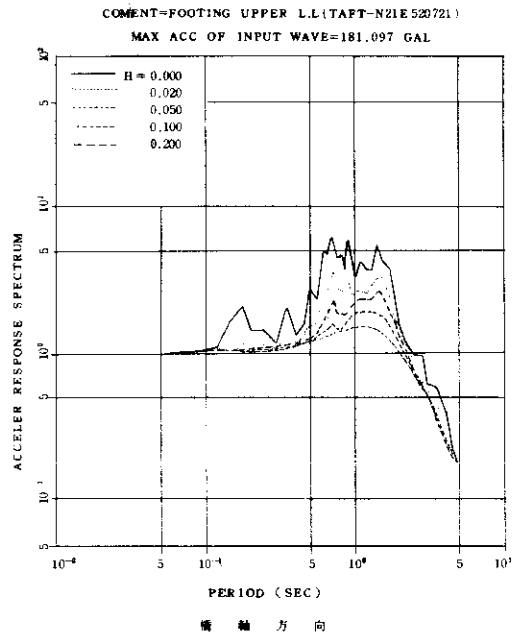
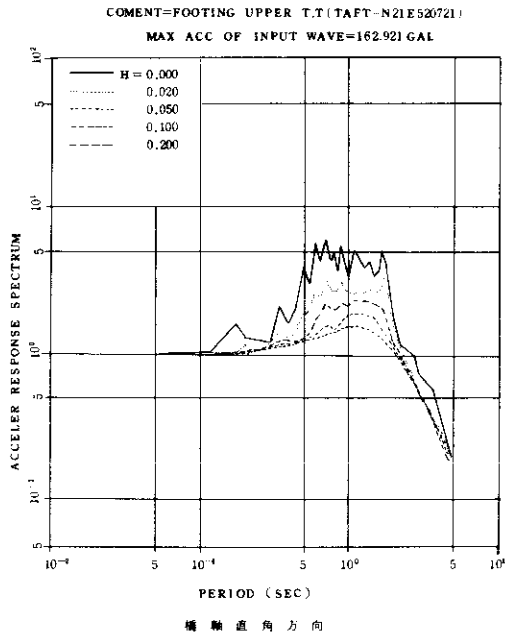


図-13 フーチング天端の加速度応答スペクトル倍率 (TAFT)

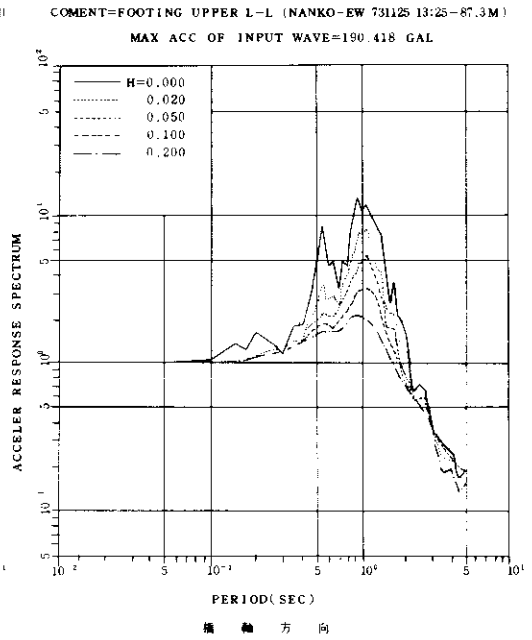
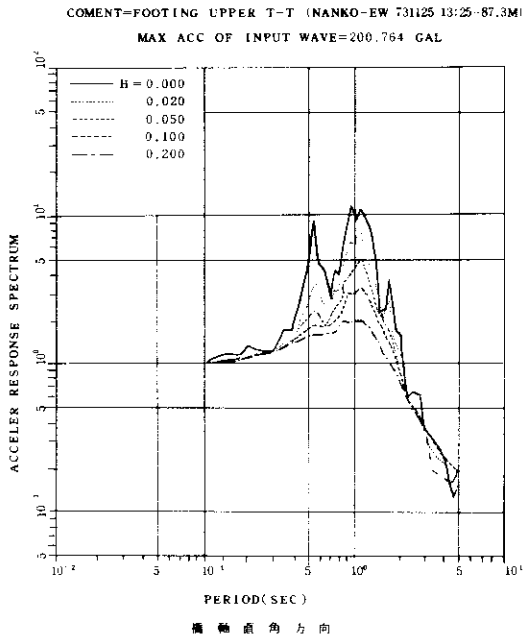


図-14 フーチング天端の加速度応答スペクトル倍率 (南港記録)



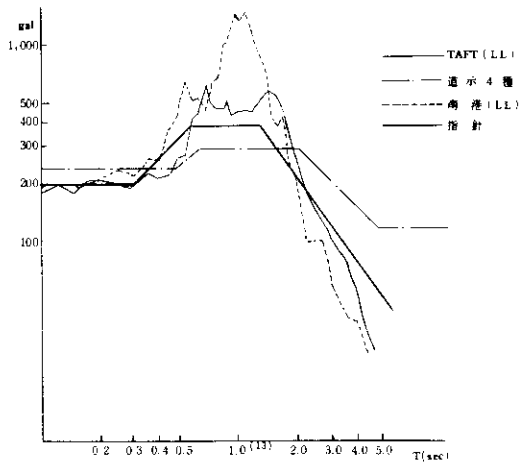


図-15 橋軸方向加速度応答スペクトル

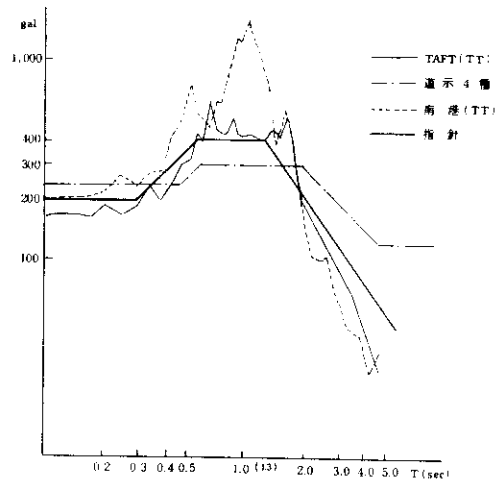


図-16 橋軸直角方向加速度応答スペクトル

### 3. 斜張橋の地震応答解析

#### 3-1 概要

上記で提案した加速度応答スペクトル曲線を用いて塔を含む上部工全体の応答解析を行った。解析モデルは図-17に示す多質点系の立体の骨組モデルとした。ケーブルは何本かを集約してモデル化した。各々の部材の結合条件は図-17に示すとおりである。入力地震は図-15の設計用スペクト

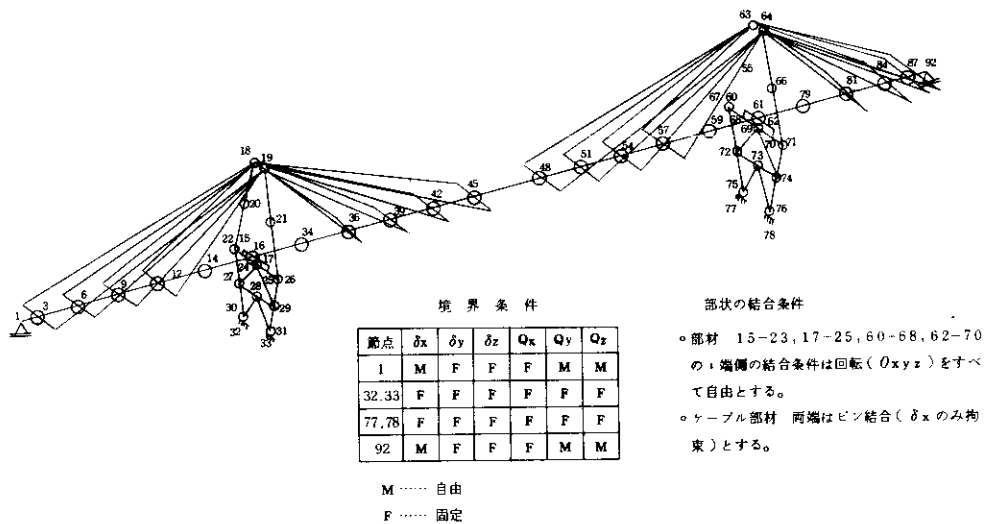


図-17 橋軸方向解析モデル

ル曲線のほか、参考としてTaft 地震、南港地震によるスペクトル曲線および、道示 V 耐震設計編 4 種地盤のスペクトル曲線を用いた。

### 3-2 解析結果および考察

解析結果として図-18に橋軸方向、直角方向の

代表的モードを、表-2、3に各々の固有周期、等価質量比を示す。また図-19~21に橋軸方向、直角方向の主桁、塔の最大応答値を示す。

耐震上特に問題となる塔に着目すると、橋軸方向においては1次の振動モードが支配的となり、卓越周期が3.7秒とかなりの長周期となる。した

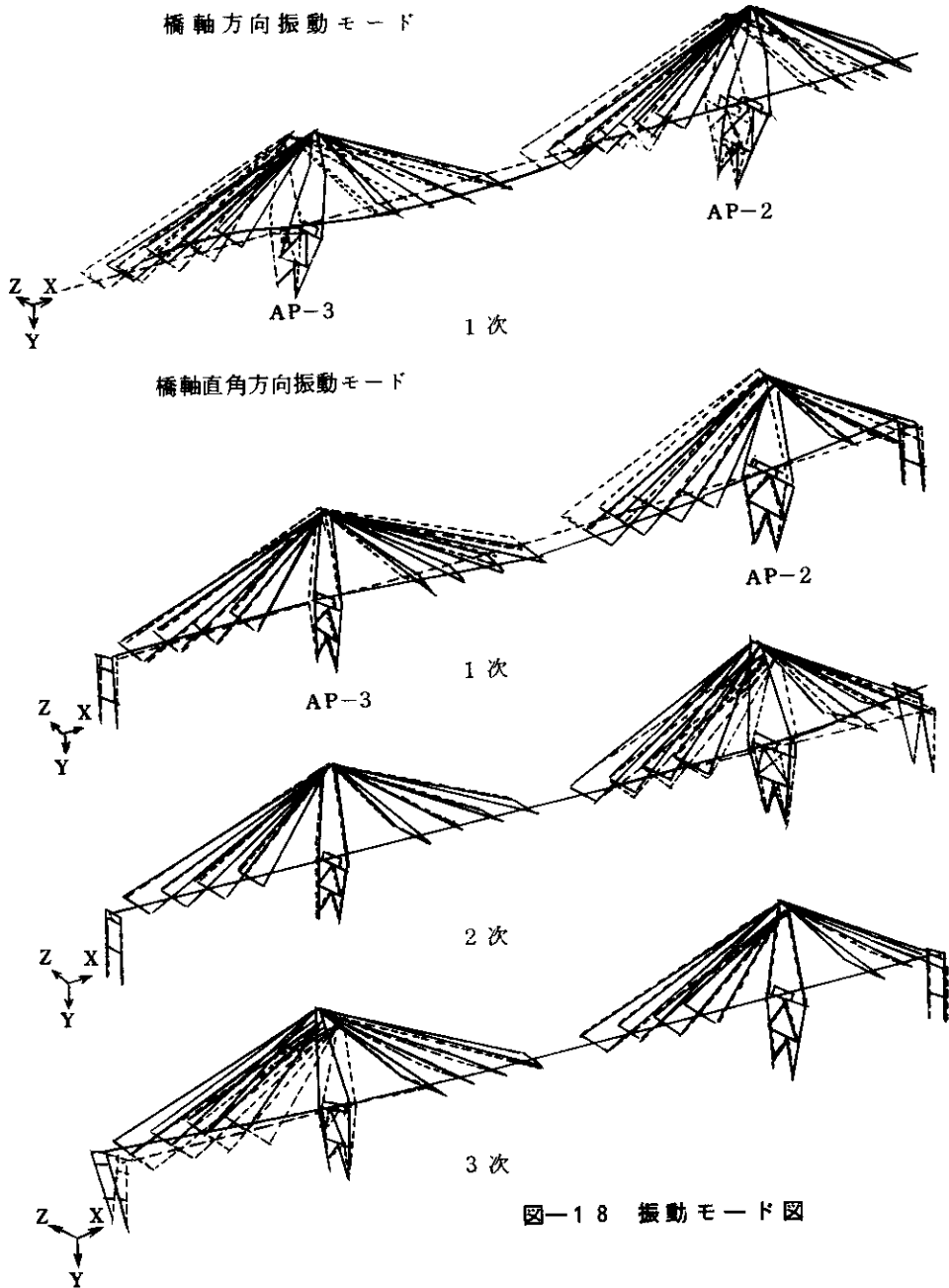


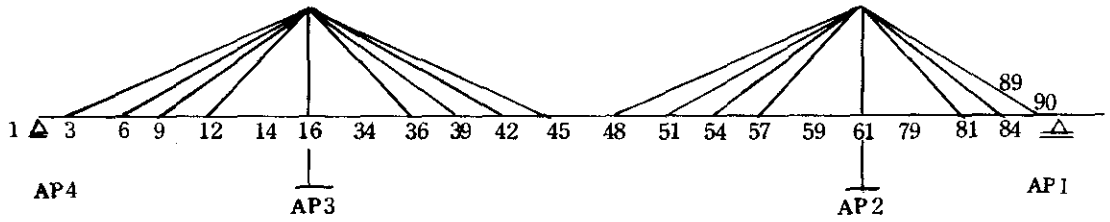
図-18 振動モード図

表一 2 橋 軸 方 向

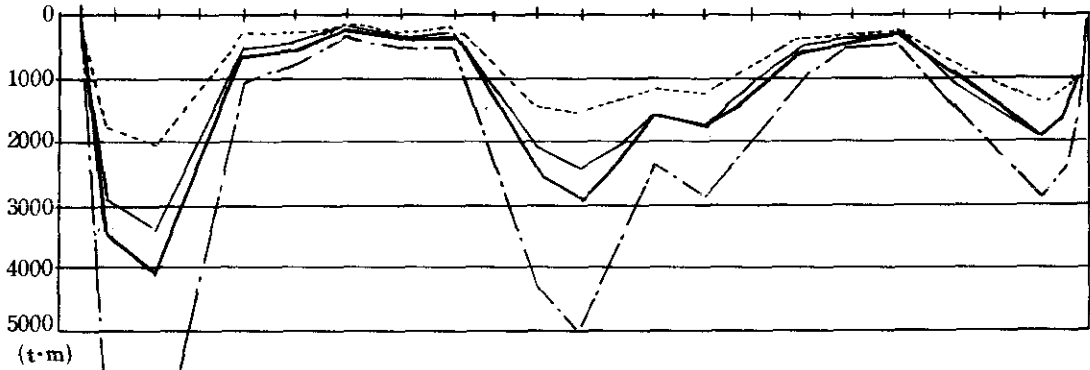
振動次數	固有振動數 f (%)	固有周期 T (sec)	等価質量比 me(X)		等価質量比 me(Y)	
			%	Σ %	%	Σ %
1	0.271	3.697	90.1	90.1	0.1	0.1
2	0.328	3.049	4.0	94.1	7.3	7.4
3	0.510	1.961	1.0	95.1	6.0	13.4
4	0.777	1.288	0.0	95.1	28.8	42.2
5	0.912	1.097	0.0	95.1	0.3	42.5
6	1.068	0.936	0.0	95.1	27.8	70.3
7	1.213	0.824	0.0	95.1	9.3	79.6
8	1.397	0.716	0.0	95.1	0.2	79.8
9	1.740	0.575	0.0	95.1	4.1	83.9
10	2.064	0.485	0.0	95.1	0.0	83.9

表一 3 橋 軸 直 角 方 向

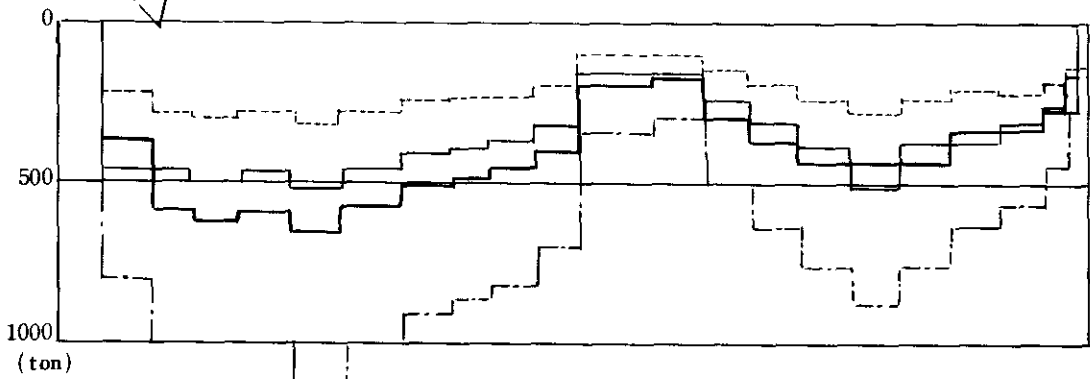
振動次數	固有振動數 f (%)	固有周期 T (sec)	等価質量比 me	
			%	Σ %
1	0.461	2.168	23.7	23.7
2	0.665	1.503	33.5	57.2
3	0.768	1.302	32.7	89.9
4	0.916	1.091	0.6	90.5
5	1.148	0.871	0.6	91.1
6	1.709	0.585	0.0	91.1
7	1.977	0.506	1.0	92.1
8	2.378	0.420	1.9	94.0
9	3.186	0.314	0.7	94.7
10	3.320	0.301	0.0	94.7



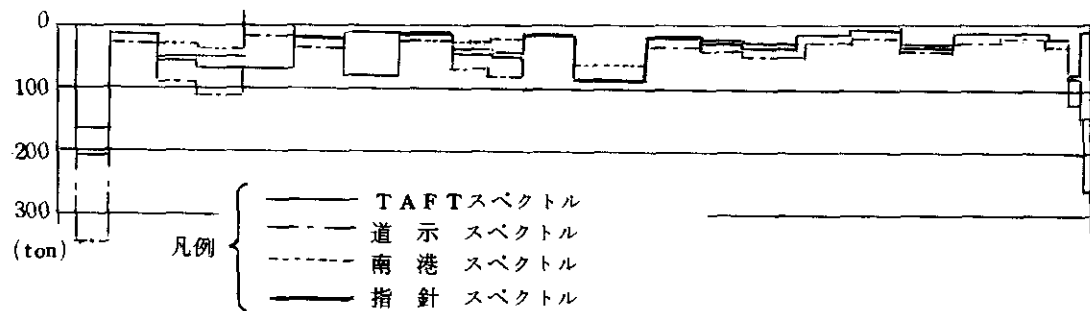
曲げモーメント



軸力



せん断力

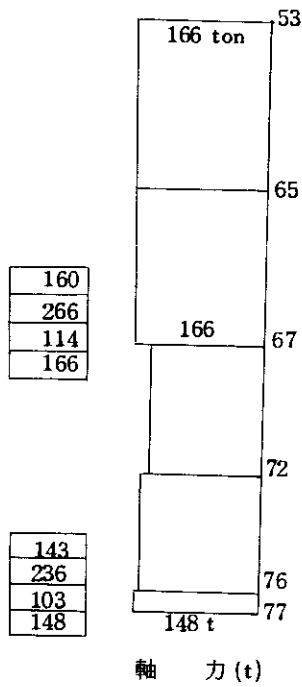
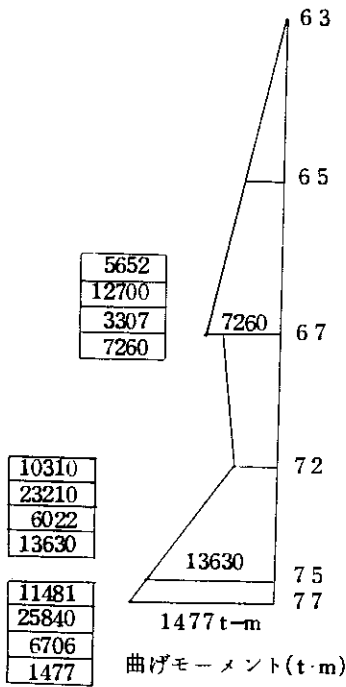


凡例

- TAF スペクトル
- - - 道示 スペクトル
- ⋯ 南港 スペクトル
- · - 指針 スペクトル

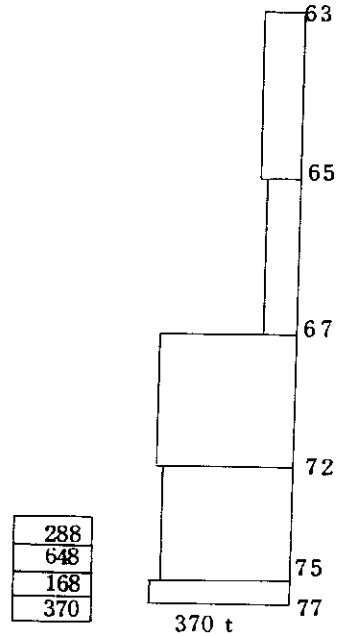
図一19 主桁の橋軸方向地震応答

塔A P-2 橋軸方向

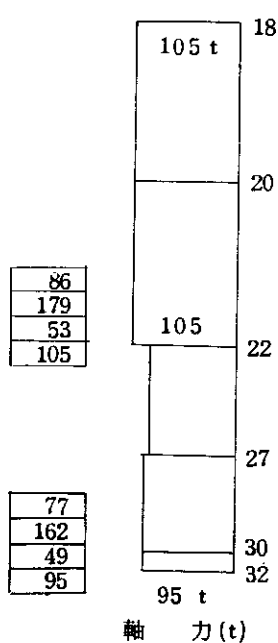
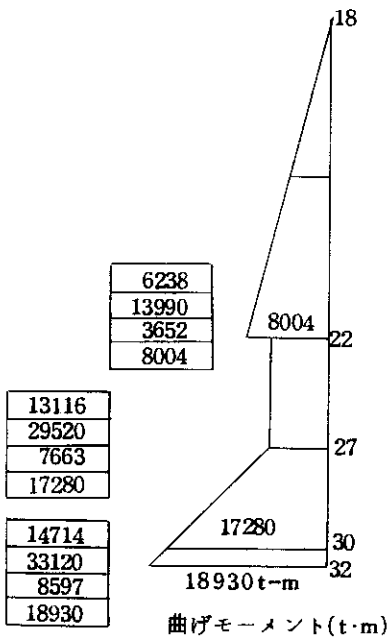


TAFTスペクトル
道示 //
南港 //
指針 //

を示す



塔A P-3 橋軸方向



TAFTスペクトル
道示 //
南港 //
指針 //

を示す。

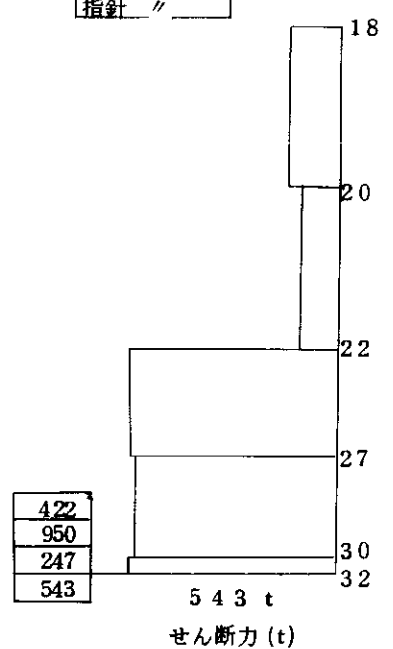
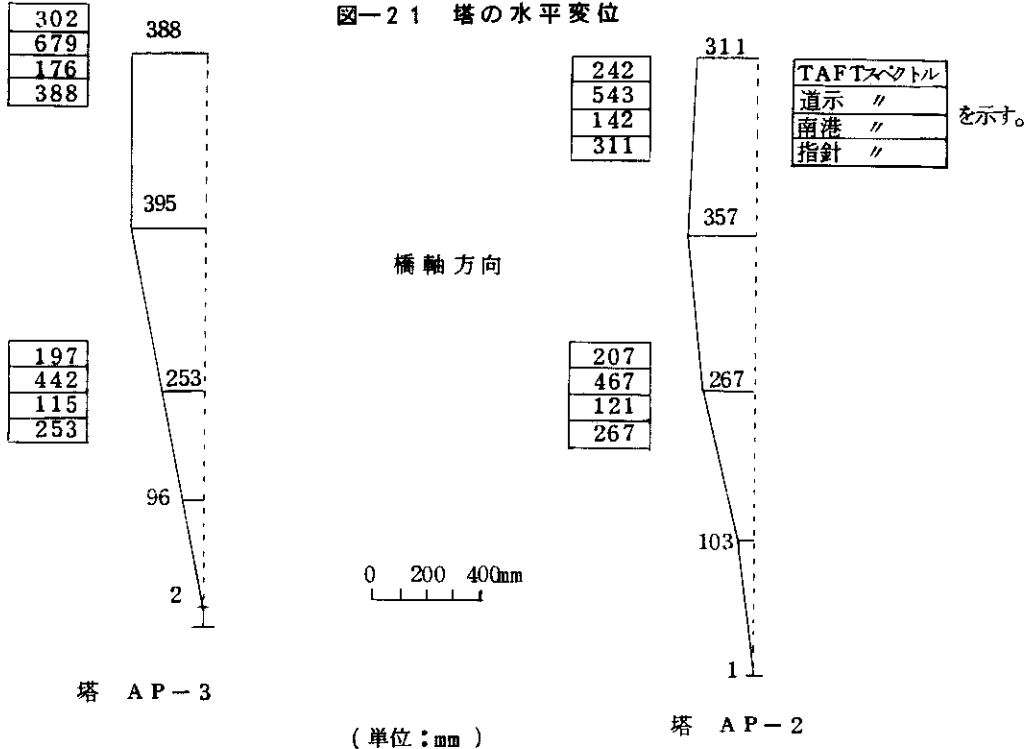


図-20

図-21 塔の水平変位



がって、長周期領域において大きな応答倍率をもたせている道示4種スペクトル曲線を用いた場合の塔の応答値が非常に大きくなる。橋軸直角方向においては、2次、3次モードが卓越し、卓越周期は、2次1.50秒(A P-2塔)3次1.30秒(A P-3塔)となる。特にA P-3塔においては、この領域で非常に大きな応答倍率を示す、南港地震によるスペクトル曲線を用いた場合が、大きな応答値を示す。

表-4に以上の応答値を用いて行った塔の断面構成を示す。なお、参考として他の地震入力を用いた場合の断面構成も示した。採用した設計用スペクトル曲線を用いた場合、地震荷重で決定する断面は塔下端部であり、他は常時荷重で決定される。

### あとがき

以上、安治川橋梁の上部工の耐震設計の概要について報告した。なお、紙面の都合により上部工の耐震設計のみにとどめた。本設計法の特長の一つとして、動的解析に用いる応答スペクトル曲線に

架橋地点の地盤特性のほか地盤と構造物の動的相互作用の効果を反映させていることがある。現在耐震工学の分野において動的相互作用の研究は重要なテーマとなっており、今後一般的な耐震設計に取り入れることが課題であると言える。

最後に本設計にあたりご指導を賜った阪神高速道路公団大阪湾岸線技術委員会、耐震設計幹事会(主査 山田善一京大教授)委員諸先生に感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 竹元、田井戸、江見; 安治川橋梁(斜張橋)の構造、橋梁と基礎、80-3
- 2) Schnable P.B., Lysmer J. and Seed H.B.; SHAKE A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Sites, EERC Report 72-12 University of California, Berkeley, 1972
- 3) 日本道路協会; 道路橋示方書・同解説V耐震設計編 昭55.5

表-4 AP-2の断面総括表

断面	塔柱 A 断面					塔柱 B 断面					塔柱 C 断面					塔柱 D 断面							
	Mx(t-m)	Mx(t-m)	N(t)	Sx(t)	Sz(t)	Mx(t-m)	Mx(t-m)	N(t)	Sx(t)	Sz(t)	Mx(t-m)	Mx(t-m)	N(t)	Sx(t)	Sz(t)	Mx(t-m)	Mx(t-m)	N(t)	Sx(t)	Sz(t)			
D + PS	4	1177	4166			48	919	4384			1131	285	5768			1131	425	5862					
$\delta$	152		109			410	-	22			197	-	- 20			197	-	- 20					
$D_1 = D + PS + \delta$	156	1177	4275			362	919	4406			1328	285	5748			1328	425	5842					
L	2151	313	998			2201	54	998			1354	70	1398			1354	81	1408					
LEQ	112	130	400			375	34	400			98	24	537			98	9	540					
T <sub>35</sub>	211	4	- 3			832	12	- 7			3158	303	- 15			3158	434	8					
T <sub>15</sub>	90	2	- 1			357	5	- 3			1353	130	- 6			1353	186	3					
W <sub>x</sub> (橋軸)	652	-	25	省	省	2249	-	- 27	省	省	9163	-	-	省	省	9163	-	22	省	省			
W <sub>z</sub> (直角)	-	405	- 194			-	1731	- 244			-	2357	1172			-	6065	2419					
地震時 (EQ)	TAFT	L-L	72	15	160						5652	28	160			10310	7	142			11481	10	143
		T-T	439	2457	618						931	2426	645			1932	6126	3147			2125	15403	6537
道示	L-L	L-L	160	25	266						12700	48	266			23210	11	234			25840	18	236
		T-T	639	1729	424						1145	1704	443			2160	5011	2479			2381	12660	5257
南港	L-L	L-L	42	11	114						3307	20	114			6022	5	102			6706	8	103
		T-T	411	2271	588						781	2326	614			1597	5071	2648			1757	12780	5444
指針案	L-L	L-L	92	16	166	略	略				7260	30	166	略	略	13270	7	147	略	略	14770	12	148
		T-T	454	1818	455						865	1819	476			1704	4705	2389			1876	11870	4992
力 組合せ	D <sub>1</sub> +L	L-L	2307	1490	5273						2563	973	5404			2682	355	7146			2682	506	7250
		T-T	2190	1299	4583						2952	857	4693			5078	572	6201			5078	817	6297
	(D <sub>1</sub> +L+T <sub>35</sub> )/1.15	L-L	665	873	3184						2199	684	3241			8773	307	4253			8773	474	4309
		T-T	665	873	3184						2199	684	3241			8773	307	4253			8773	474	4309
	(D <sub>1</sub> +W+T <sub>15</sub> )/1.35	L-L	469	2215	3113						3968	580	2919			2771	3862	5545			2885	9437	7598
		T-T	469	2215	3113						3968	580	2919			2771	3862	5545			2885	9437	7598
	D <sub>1</sub> +EQ+L <sub>EQ</sub> +T <sub>35</sub> /7	L-L	586	1787	2999						8114	592	2982			15288	265	3831			16835	387	3891
		T-T	586	1787	2999						8114	592	2982			15288	265	3831			16835	387	3891
	南港	L-L	452	2106	3095						1103	1932	3186			2574	3241	5251			2668	7894	6955
		T-T	452	2106	3095						1103	1932	3186			2574	3241	5251			2668	7894	6955
指針案	L-L	L-L	478	1839	3017						4914	581	2923			9441	262	3780			2738	7359	6689
		T-T	478	1839	3017						4914	581	2923			9441	262	3780			2738	7359	6689
断面寸法	使用材質 SM50Y 16-Rib 320×32					使用材質 SM50Y 16-Rib 320×32					使用材質 SM58 16-Rib 320×32 ( )内: 道示					使用材質 SM58 16-Rib 320×36 ( )内: TAFT							
応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	種 別	常時	TAFT	道示	南港	指針案	常時	TAFT	道示	南港	指針案	暴風時	TAFT	道示	南港	指針案	常時	TAFT	道示	南港	指針案		
	$\sigma_c$	824	487				825		455	487		(786)587	765	485				755	430	768	778		
$\sigma_{bx}$	240	356				151		92	300		(49)43	535	50				939	43	869	843			
$\sigma_{bz}$	303	61				333		1055	143		(287)937	296	1009				228	1475	234	250			
$\sigma_{ca}$	1572	1572				1577		1577	1577		1437	1437	1705				1707	1707	1707	1713			
$\sigma_{cax}, \sigma_{caz}$	2100	2100				2100		2100	2100		2600	2600	2600				2600	2600	2600	2600			
$\frac{\sigma_c}{\sigma_{ca}} + \frac{\sigma_{bx}}{\sigma_{ba} \times (1 - \sigma_c / \sigma_{eax})}$	0.829	0.542				0.795		0.938	0.555		0.791 (0.772)	0.792	0.755				0.915	0.916	0.899	0.901			
$\frac{\sigma_{bz}}{\sigma_{baz} (1 - \sigma_z / \sigma_{eaz})}$																							
$\tau_x$																							
$\tau_z$		省		略			省		略			省		略			省		略				
$\tau_a$																							

断面位置

