

土木研究所資料

斜張橋の耐震性に関する研究

—(その6)水郷大橋の動的特性調査—

Seismic Design Procedure of Cable-Stayed Bridges
—Part6. Dynamic Characteristics of Suigoh Bridge
Based on Strong Motion Record—

昭和63年10月

建設省土木研究所
地震防災部耐震研究室

Copyright © (1988) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written Permission of the Director General of P.W.R.I

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複写は、土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

斜張橋の耐震性に関する研究

—(その6)水郷大橋の動的特性調査—

耐震研究室 室長 川島 一彦
研究員 運上 茂樹
吾田 洋一

要 旨

近年、大規模特殊事業関連の道路において長大スパンの斜張橋が採用される事例が急増している。これは、斜張橋が従来の吊橋と連続桁橋の中間の特性を有し、吊橋のように巨大なアンカー基礎を必要とせず、軟質な地盤上に建設される長大橋として構造的に適しているとともに橋梁技術の進歩に伴い、長大スパン化が可能となったためである。しかしながら、斜張橋に対しては、従来震害経験がなく、また、強震観測等による動的特性の把握も十分でないのが実情である。

斜張橋の地震応答特性の調査及び斜張橋の動的特性を取り入れた耐震設計法の開発を目的として、一般国道51号が、1級河川利根川を渡る千葉・茨城両県境に架設されている建設省関東地方建設局管内の水郷大橋に強震観測システムを設置し、昭和61年3月から観測を開始した。現在までに加速度レベルの低い記録も含めて30数波の記録が得られた。

本報告は、これらの記録を解析するとともに、水郷大橋の減衰特性に関して検討した結果をとりまとめたものである。

キーワード：斜張橋、水郷大橋、強震記録、減衰特性

目 次

1. まえがき	1
2. 水郷大橋の地震観測の概要	2
2. 1 水郷大橋の概要	2
2. 2 地震観測システムの概要	6
3. 強震記録の解析	10
3. 1 観測記録一覧	10
3. 2 強震記録の解析	13
4. 水郷大橋の動的解析	22
4. 1 解析モデル	22
4. 2 固有値解析結果	23
4. 3 動的解析による水郷大橋の減衰定数の推定	36
5. 結 論	50
謝 辞	51
参考文献	52
付属資料 ー解析モデル諸元ー	53

1. まえがき

近年、大規模特殊事業関連の道路において、長大スパンの斜張橋が採用される事例が急増している。これは、斜張橋が軟質な地盤上に建設される長大橋として構造的に適しているとともに、橋梁技術の進歩に伴い、長大スパン化が可能となったためである。

斜張橋は、構造的に従来の吊橋と連続桁橋の中間の特性を有するものである。構造的には、吊桁を主塔を介した斜めケーブルで吊り、補剛するといういわゆる自定式構造であり、吊橋のような巨大なアンカー基礎を必要とせず、また、桁の構造、塔の形状、ケーブルの配置等それぞれについて多様な構造系を創り得ることが特徴として挙げられる。

斜張橋は、1950年以降その有利性、確実性が確かめられ、ドイツを中心としてその建設が広まった。我が国においても、その経済性及び力学的合理性が認められ、1960年の勝瀬橋（中央支間128m）をはじめとして、1968年の尾道大橋（中央支間215m）、1975年の末広大橋（中央支間250m）等年々スパンの長大化が進んでいる。また、美観的にも優れていることから長大橋梁に限らず、横断歩道橋等今後ますます建設されていくことが予想される。また、我が国における斜張橋は鋼斜張橋が主流を占めているが、最近では、PC橋のメリットを生かしたPC斜張橋の建設も進みつつある状況である。

しかしながら、斜張橋に対しては、従来震害経験がなく、また、強震観測等による動的特性の把握も十分でないのが実情であり、早急に斜張橋の動的特性を取り入れた耐震設計法の開発が必要とされている。斜張橋の設計において、地震の影響が支配的となるのは、一般に塔基部及び下部構造であり、また、上部構造から下部構造に伝達される地震力を求めるためには、上部構造系の全体としての振動を評価することが重要である。また、上述のように斜張橋は、吊り構造系、基礎構造物系、タワー系、ケーブル系とそれぞれ異なる構造系から構成されているため、地震時には、それぞれの系の独自の振動が入り混じった複雑なものとなり、低次の振動のみならず、高次の振動モードが全体の応答に寄与する場合が多い。

以上のような観点から、斜張橋の地震応答特性の調査を目的として一般国道51号が1級河川利根川を渡る千葉・茨城両県境に架設された水郷大橋に強震観測システムを設置し、昭和61年3月から観測を開始した。現在までに加速度レベルの低い記録も含めて30数波の記録が得られた。

本報告は、これらの観測記録を整理するとともに、水郷大橋の減衰特性に関して検討した結果をとりまとめたものである。

2. 水郷大橋の地震観測の概要

2.1 水郷大橋の概要

強震計を設置した水郷大橋は、図-2.1に示すように一般国道51号が利根川を渡る千葉県佐原市と茨城県稲敷郡東村の間に架設されている橋長535.25mの橋梁である。昭和11年に架設されたゲルバートラス橋を主径間とする旧橋は、当時の代表的な橋梁であったが、年毎に増加する重車輛等のために老朽化が著しくなっており、また、この地区は、北に鹿島臨海工業地帯、南に京葉工業地帯及び新東京国際空港を控え、今後大幅な交通量の増加が予想されるため、旧橋の上流約300mに新しい橋梁をかけることとなった。事業費約50億円を費して、昭和48年10月着工、昭和52年3月完成、同年4月20日一般交通に供用開始された。

水郷大橋の構造概要を表-2.1に、一般図をそれぞれ、図-2.2、写真-2.1、写真-2.2に示す。水郷大橋架設地点は、支持層40～50mと地盤条件が悪く、河川条件も非常に厳しいため、下部工には、施工性を考えた大規模な仮締切兼用鋼管矢板井筒基礎が採用された。また、上部工は2径間連続非対称、耐風性を考慮した逆台形3室箱桁断面を有する主桁とこれに剛結された2.8m×2.5mの単室断面のフレキシブルタワーからなり、PPWSが用いられたケーブルは、ハープ型3段に張られ、ケーブルと主塔とは上段可動、中・下段固定の構造が採用されている。

表-2.1 水郷大橋構造概要

路線名	一般国道51号(千葉県千葉市～茨城県水戸市)	
河川名	一級河川 利根川	
工事箇所	自 千葉県佐原市 至 茨城県稲敷郡東村	
橋の等級	一等級(TL-20)	
橋長	535.25m	
斜角	83°53'00''	
最大支間長	178.85m	
最小支間長	80.9m	
道路幾何構造	道路構造令3種1級 車道部7.75m×2+歩道部2.5m×2=20.5m 横断勾配2%,縦断勾配0.2%直線勾配 (一部放物線勾配)	
上部構造	主径間	2径間連続鋼床版斜張橋一連 (178.85+111.6=290.45m)
	側径間	3径間連続鋼床版箱桁橋一連 (80.9m×3=242.7m)
下部構造	橋台	R.C逆T型橋台、鋼管杭基礎2基
	橋脚	R.C逆T型橋脚、鋼管井筒基礎4基(小判型)
設計震度	Kh=0.24	
位置	東経 140°30' 北緯 35°54'	

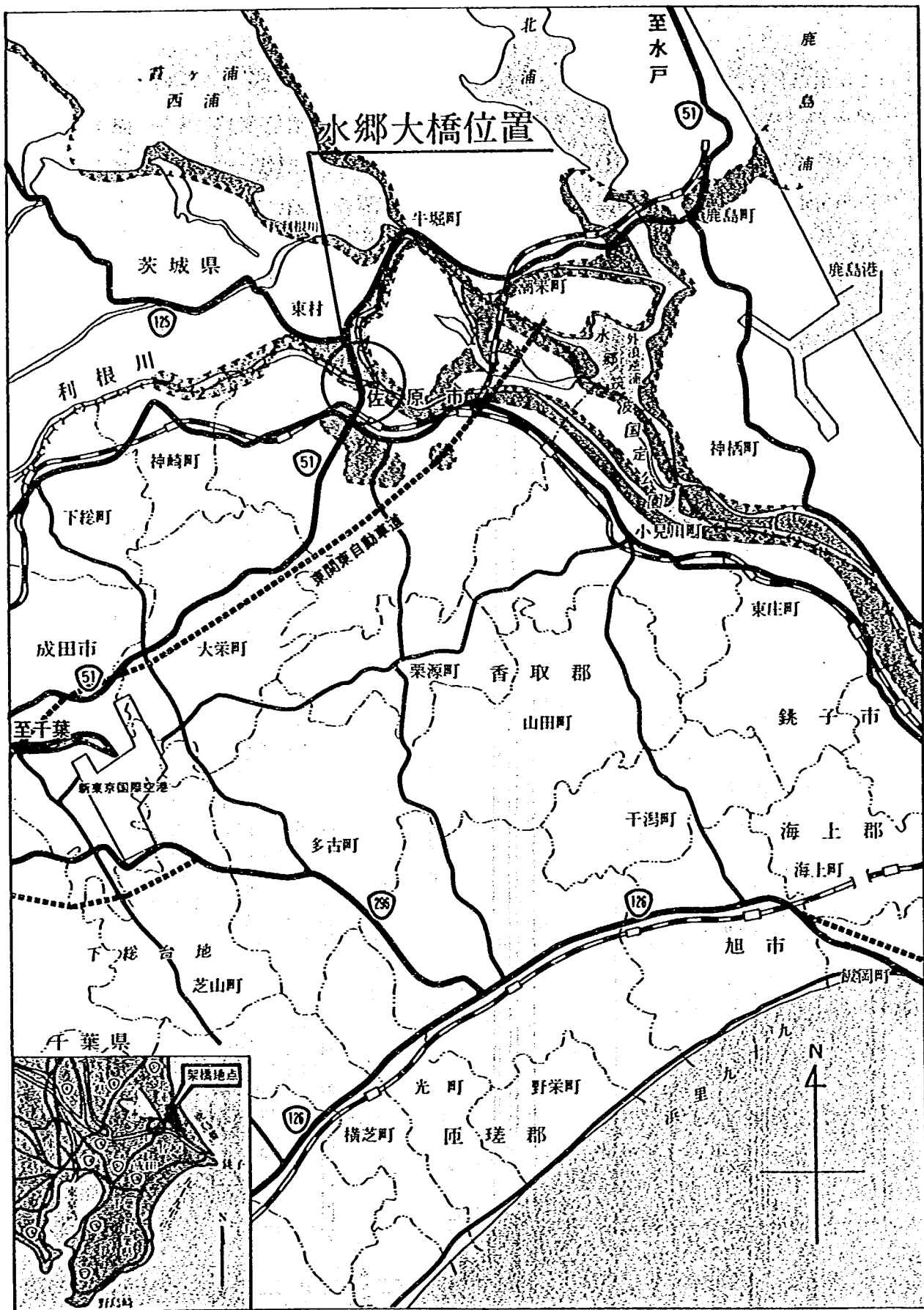


図-2.1 架橋位置

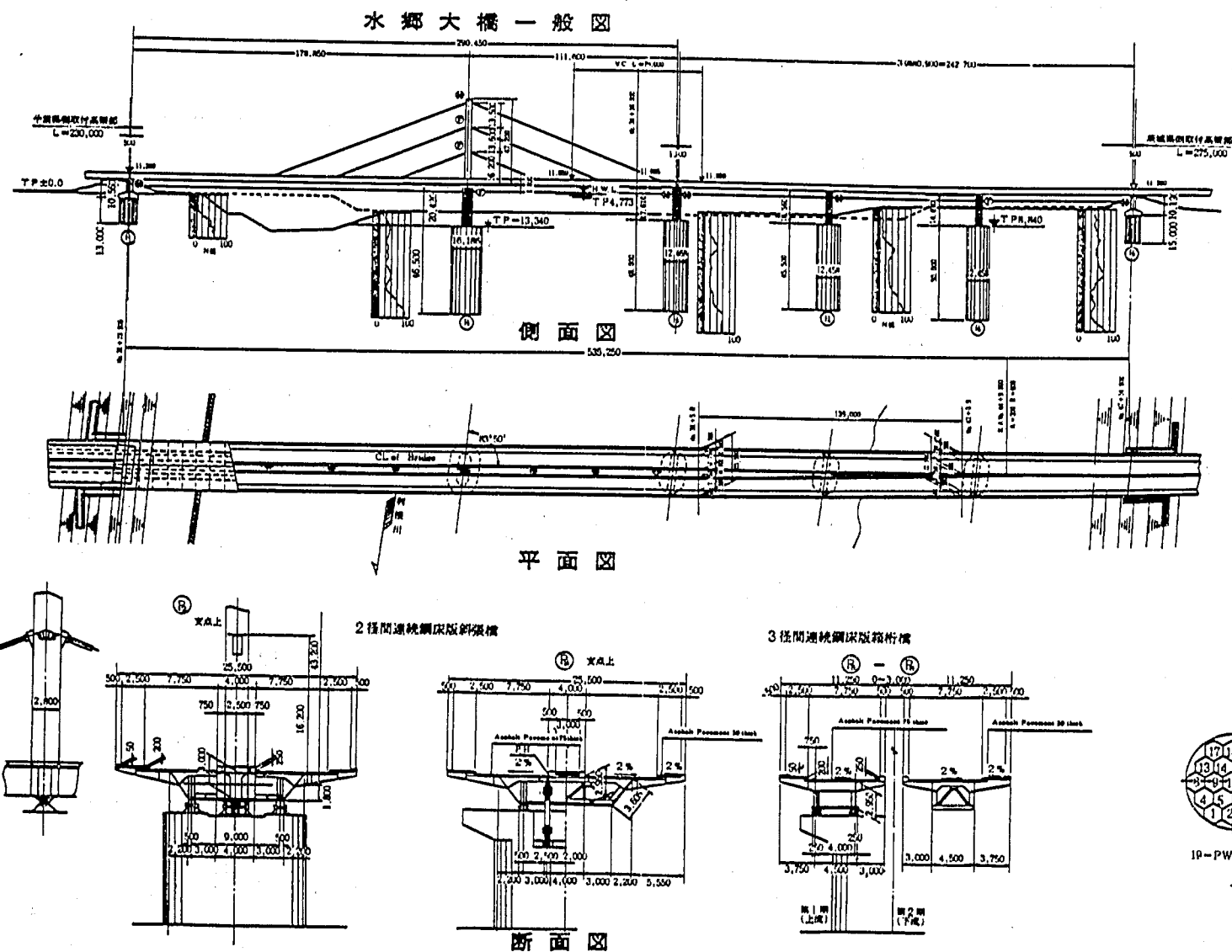


図-2.2 水郷大橋一般図

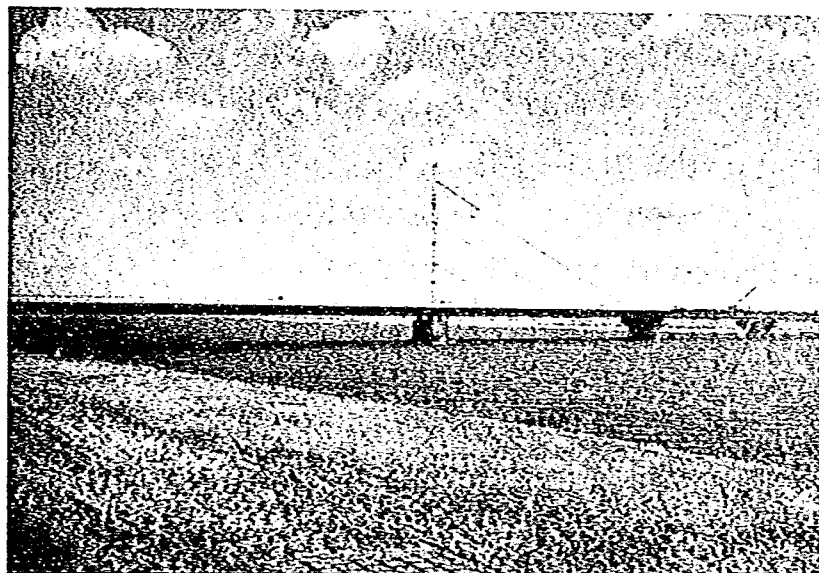


写真-2.1 水郷大橋

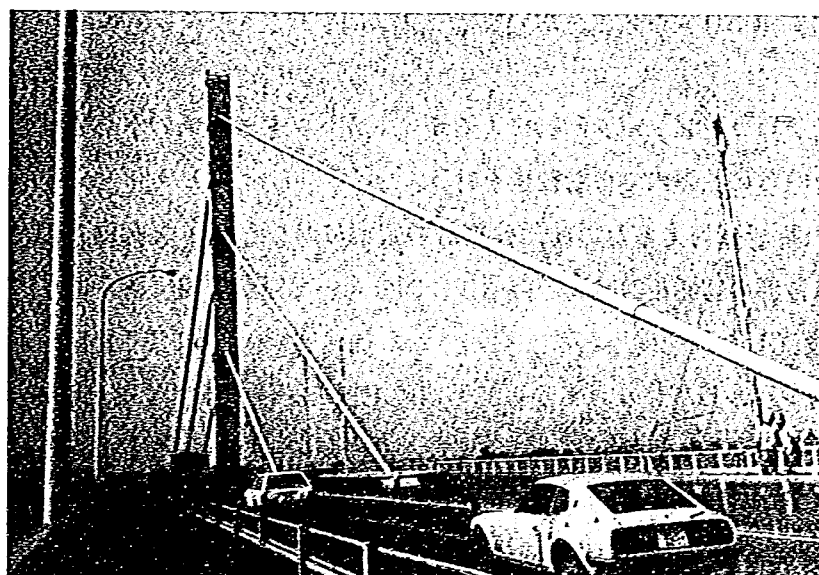


写真-2.2 水郷大橋

2.2 地震観測システムの概要

地震観測システム全体構成は、図-2.3及び図-2.4に示すように水郷大橋の塔および桁内に取り付けられた地上用加速度換振器5台、および千葉県側取付高架橋P₁基礎近傍の地中に埋め込まれた地中用加速度換振器1台の計6台、水郷大橋千葉県側端部橋台上に設置された観測小屋内の増幅器、集録装置、無停電電源装置から構成される。ここで、加速度換振器と集録装置の間は、ケーブルを敷設した。地震記録集録装置は、マイクロプロセッサ制御により各種データをデジタル値で集録する装置であり、図-2.5に示すようにADコンバータ、遅延装置、カートリッジ式磁気テープ記録装置、スターター装置、自動較正水晶時計、モニター再成用8CH DAコンバータから構成される。

本強震計の仕様は、以下に示す通りである。

(1) 加速度換振器

加速度換振器は、橋軸方向及び橋軸直角方向の水平2成分の加速度を電気信号として検出するものであり、換振器本体は地上用、地中用共に共通である。換振部は、速度帰還方式のサーボ型加速度計を用いており、その主要特性を表-2.2に示す。

加速度換振器の方向は、橋軸方向については、茨城県側をX(+), 千葉県側をX(-)とし、橋軸直角方向については、川の下流側をY(+), 上流側をY(-)とした。

(2) 強震記録装置

強震記録装置は、6台の加速度換振器から合計12成分の信号を受け、これをAD変換器により数値化した後、自動時刻較正されたタイムコードとともにデジタルカートリッジ式磁気テープに記録するものである。AD変換は、12 bit AD変換装置を用いて $\frac{1}{100}$ 秒間隔で行うものとした。

(3) その他

時計機能は、マイクロコンピュータ制御によるオートカレンダー方式の水晶時計を用いており、NHKラジオの時報により0.01秒の誤差内で自動較正を行う。

また、商用電源の瞬断に備えるために、強震計の電源にフローティング形式のバッテリーを使用し、バッテリーの容量は電源の切断後24時間の待期後に30分間の記録が可能であるように定めた。

起動は、地中に設置した加速度換振器で感知された加速度が0.8 gal (可変) 以上になった瞬間にかかり、入力信号が起動レベル以下になってから30秒間の記録を継続する。また、起動は地中の加速度換振器の2成分のうち、どちらかでも起動レベル以上になった場合に記録を開始するものとした。

遅延装置は、32 K バイトメモリーを有し、サンプリング間隔100 Hz, 16 CH の時、遅延時間は10秒である。

加速度増幅器、デジタル集録装置及び無停電電源装置の主要特性をそれぞれ表-2.3～表-2.5に示す。

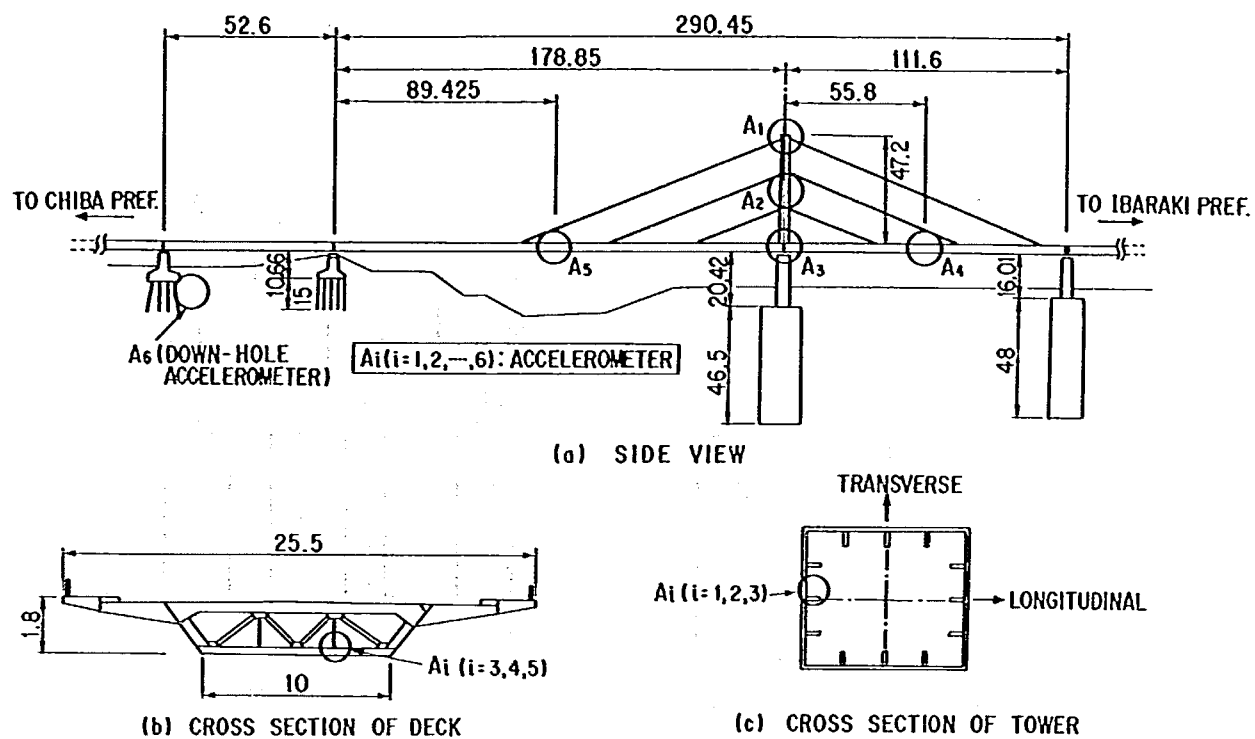


図-2.3 水郷大橋の地震観測位置

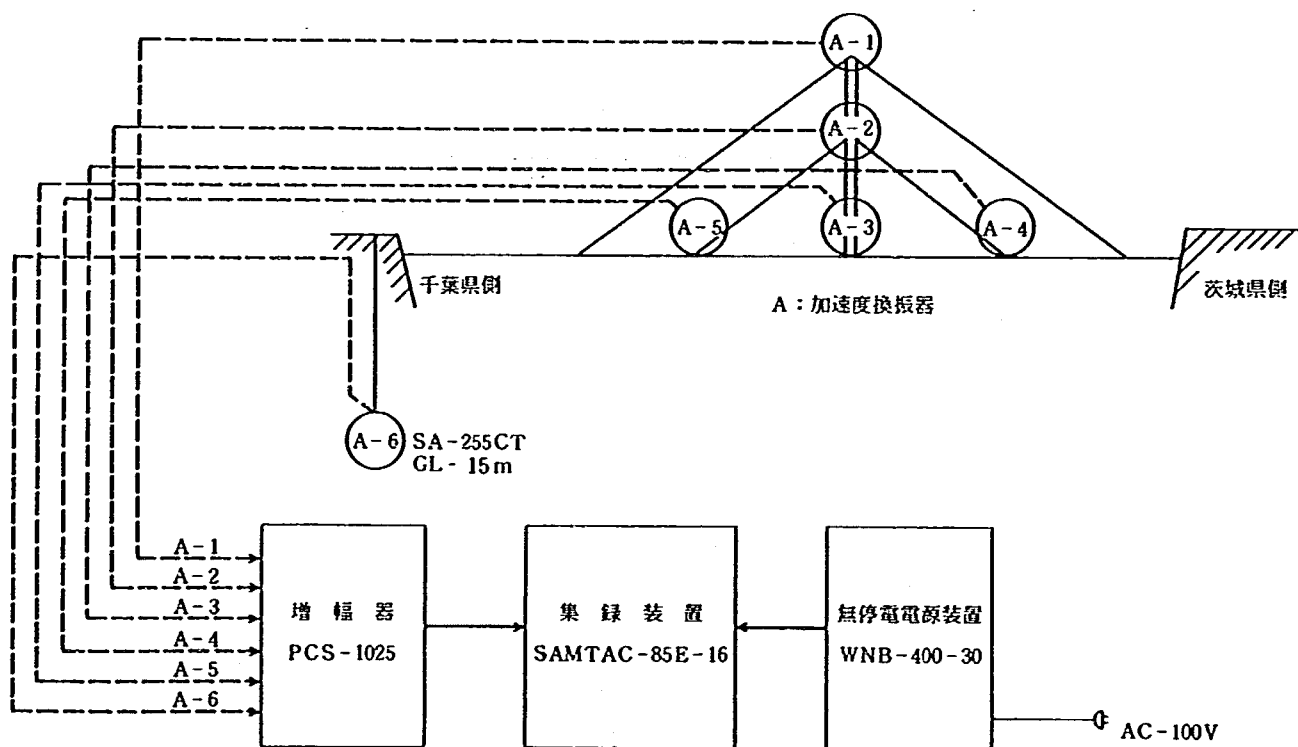


図-2.4 地震観測システム全体構成図

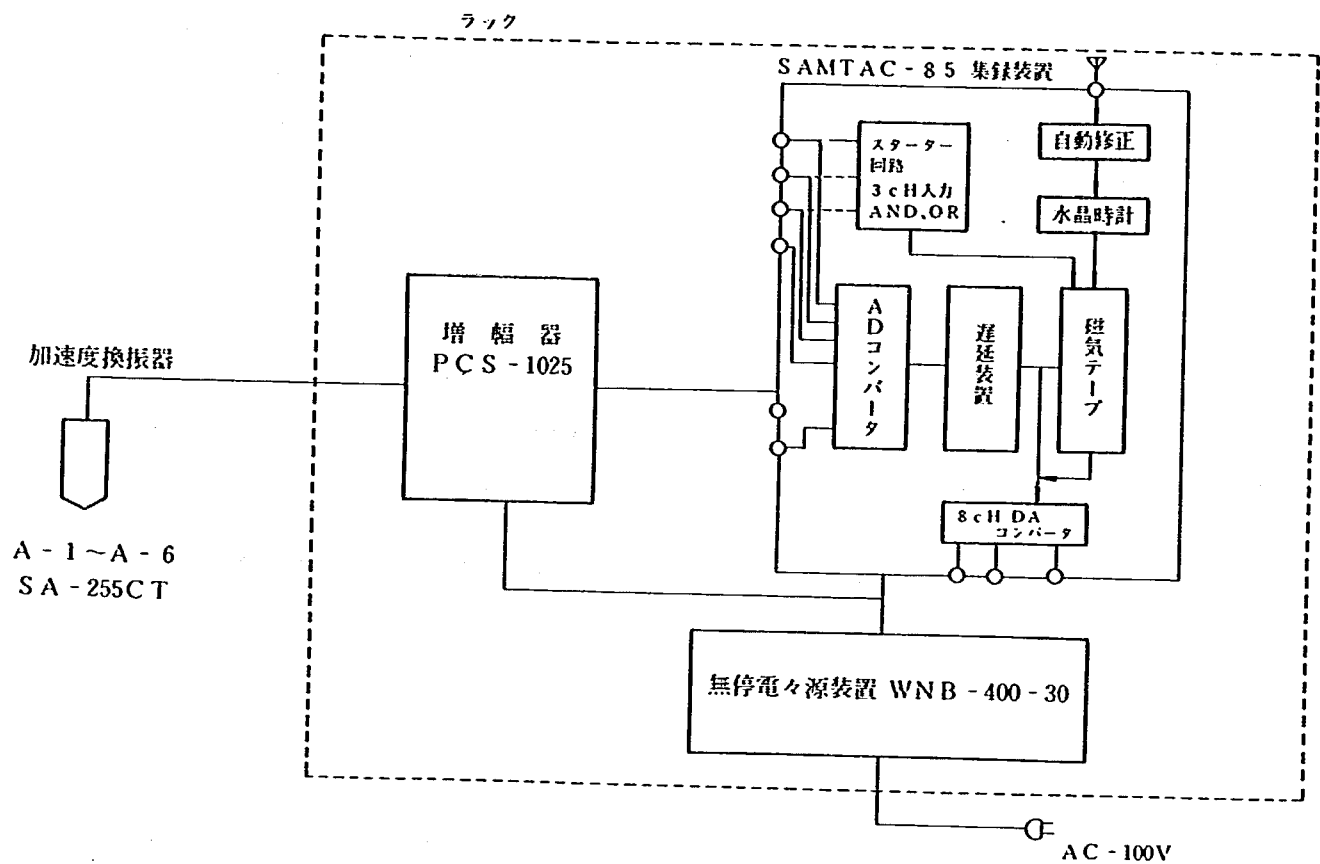


図-2.5 地震記録集録装置構成図

表-2.2 加速度換振器の主要特性

サーボ型 加速度計		
型 式	SA-255CT	
成 分	水平2成分	
感 度	15 μ A/gal	
周波数特性	0.1~35 Hz	
帯域内感度差	$\pm 2\%$ 以下	
位 相 差	$\pm 5^\circ$ 以下	
減衰定数	30以上	
固有振動数	5 Hz	
ケース耐水圧	30気圧以上	
感度の温度係数	$5 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 以内	
設置誤差角度	5度以内	
最大埋設深さ	300 m	
外形寸法	$\phi 80 \times 351$ mm	
重 量	6 kg	

表-2.4 デジタル集録装置の主要特性

デ ィ ジ タ ル 集 録 装 置	
型 式	SAMTAC-85E-16
記 録 チ ャ ン ネ ル	16 CH (サンプリング周波数 100 Hz)
A/D 変 換 装 置	12 bit バイナリー
エリアジングフィルター	30 Hz - 1 db 以内 (-12 db/Oct)
入 力 電 圧	± 5 V (AGCがON持 ± 10 V)
入力インピーダンス	100 K Ω
サンプリング周波数	10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 Hz
遅 延 装 置	32 Kバイトメモリー サンプリング 100 Hz 16 CHの場合-10秒 サンプリング 200 Hz 8 CHの場合-5秒
水 晶 時 計	NHKラジオの時報により 0.01 秒の精度で自動修正
ス タ ー タ ー 回 路	レベル判定-2 CHの"OR"又は"AND" レベル判定-フルスケールの 0.05~20%
磁 気 テ ー プ 装 置	カートリッジ式 8トラック 7700BPI 450フィート
記 録 時 間	16 CHサンプリング 100 Hz 時 約 150 分
モニター用DA変換装置	8 CH同時アナログモニター
電 源	AC-100 V $\pm 10\%$
消 費 電 力	約 160 VA

表-2.3 加速度増幅器の主要特性

加 速 度 用 増 幅 器	
型 式	PCS-1025
感 度	10 mV/gal
測 定 範 囲	0.03~1000 gal
校正レベル設定範囲	0~1000 gal
確 度	誤差 0.3%以下
周 波 数	1024 Hz
周波数確度	10^{-4} 以上
信 号 波 数	正弦波 (歪率 1%以内)
出 力 信 号	定電流方式 (15 μ A/gal)
信号発生回路	水晶発信回路使用 デジタル式信号合成回路
電 源	AC-100 V

表-2.5 無停電電源装置の主要特性

無 停 電 電 源 装 置	
型 式	WNB-400-30
入力交流電圧	AC-100 V (単相)
電圧変動範囲	$\pm 10\%$
定格周波数	50 Hz
出 力 電 圧	AC-100 V (50 Hz $\pm 0.1\%$)
最大出力容量	400 VA
停電保値時間	30分
使用蓄電池	無注水型鉛蓄電池
周囲温度	0~45 $^\circ\text{C}$

3. 強震記録の解析

3.1 観測記録一覧

昭和61年3月から観測を開始して、昭和63年1月まで表-3.1に示すように合計33回の地震記録が得られた。図-3.1にこれらの地震の震源位置を示す。これらの記録は、そのほとんどがマグニチュード5程度の小さな地震により得られたものである。これらの33地震により水郷大橋の各観測点で得られた加速度の最大値を示すと表-3.2のようになる。

ただし、茨城県側の桁中央部 (A 4) の橋軸直角方向成分についてはセンサーの不良のため、記録は得られなかった。

表-3.1 水郷大橋で観測された地震記録

EQ No	DATA	EPICENTER			EPICENTRAL DISTANCE (Km)	JMA MAGNITUDE	DEPTH (Km)
		REGION	LONGITUDE	LATITUDE			
EQ-1	1986. 5. 2	E. OFF IBARAKI PREF.	141° 08'	36° 20'	74	4.4	45
EQ-2	1986. 5. 2	E. OFF IBARAKI PREF.	141° 08'	36° 21'	75	4.5	41
EQ-3	1986. 5. 5	E. OFF FUKUSHIMA PREF.	141° 31'	36° 55'	144	4.9	78
EQ-4	1986. 5. 15	EASTERN FUKUSHIMA PREF.	140° 43'	37° 32'	182	4.9	83
EQ-5	1986. 5. 15	E. OFF IBARAKI PREF.	140° 35'	36° 14'	104	4.7	44
EQ-6	1986. 6. 24	SE. OFF BOSO PENINSULA.	140° 43'	34° 49'	123	6.5	73
EQ-7	1986. 7. 10	NORTHERN IBARAKI PREF.	140° 36'	36° 13'	36	4.8	81
EQ-8	1986. 7. 20	NEAR CHOSHI CITY	140° 59'	35° 50'	44	4.0	36
EQ-9	1986. 8. 8	SW IBARAKI PREF.	140° 00'	36° 18'	63	4.4	81
EQ-10	1986. 9. 20	NORTHERN IBARAKI PREF.	140° 40'	36° 28'	64	5.0	56
EQ-11	1986. 10. 14	E. OFF FUKUSHIMA PREF.	141° 13'	37° 04'	144	5.7	53
EQ-12	1986. 10. 25	E. OFF IBARAKI PREF.	140° 42'	36° 26'	61	4.3	58
EQ-13	1987. 1. 9	CENTRAL IWATE PREF.	141° 47'	39° 51'	453	6.9	71
EQ-14	1987. 1. 27	E. OFF CHIBA PREF.	141° 15'	35° 26'	86	5.2	39
EQ-15	1987. 2. 6	E. OFF FUKUSHIMA PREF.	141° 56'	35° 57'	129	6.4	18
EQ-16	1987. 2. 6	E. OFF FUKUSHIMA PREF.	141° 54'	36° 59'	173	6.7	31
EQ-17	1987. 2. 11	SW. IBARAKI PREF.	139° 51'	36° 10'	65	4.8	60
EQ-18	1987. 2. 13	E. OFF IBARAKI PREF.	140° 59'	36° 38'	92	5.3	46
EQ-19	1987. 3. 24	W. OFF NIIGATA PREF.	137° 55'	37° 28'	288	5.9	21
EQ-20	1987. 4. 7	E. OFF FUKUSHIMA PREF.	141° 54'	37° 17'	198	6.6	37
EQ-21	1987. 4. 10	SW. IBARAKI PREF.	139° 52'	36° 08'	62	5.1	57
EQ-22	1987. 4. 17	E. OFF FUKUSHIMA PREF.	141° 37'	37° 03'	162	6.0	42
EQ-23	1987. 4. 17	NORTHERN OHIBA PREF.	140° 08'	35° 46'	37	5.1	75
EQ-24	1987. 4. 23	E. OFF FUKUSHIMA PREF.	141° 37'	37° 04'	163	6.5	49
EQ-25	1987. 5. 10	E. OFF IBARAKI PREF.	141° 55'	36° 12'	131	5.5	50
EQ-26	1987. 5. 17	SE. OFF IBARAKI PREF.	140° 44'	35° 50'	23	4.4	61
EQ-27	1987. 6. 16	CENTRAL CHIBA PREF.	140° 12'	35° 37'	42	4.4	71
EQ-28	1987. 6. 30	SW. IBARAKI PREF.	140° 06'	36° 12'	49	5.1	55
EQ-29	1987. 7. 12	SW. IBARAKI PREF.	140° 04'	36° 09'	47	4.8	55
EQ-30	1987. 7. 16	SE. OFF SIZUOKA PREF.	138° 18'	33° 06'	371	6.3	312
EQ-31	1987. 9. 24	E. OFF IBARAKI PREF.	140° 20'	36° 37'	80	5.8	42
EQ-32	1987. 10. 4	E. OFF FUKUSHIMA PREF.	141° 40'	37° 18'	187	5.8	51
EQ-33	1987. 12. 17	E. OFF CHIBA PREF.	140° 29'	35° 21'	62	6.7	58

表-3.2 水郷大橋で観測された最大加速度

[単位: cm/sec^2]

EQ No.	DATE	A-1		A-2		A-3		A-4	A-5		A-6	
		LG.	TR.	LG.	TR.	LG.	TR.	LG.	LG.	TR.	LG.	TR.
1	1986. 5. 2	17.6	19.5	7.1	10.5	2.2	2.4	4.2	4.2	7.3	1.2	1.5
2	1986. 5. 2	25.9	18.1	10.7	9.3	2.9	2.9	4.9	5.4	5.4	1.7	1.5
3	1986. 5. 5	12.9	13.2	4.9	7.6	3.9	3.4	5.4	3.9	4.9	1.7	2.2
4	1986. 5. 15	13.9	8.3	4.2	5.6	2.2	2.0	3.7	2.4	2.4	1.5	1.7
5	1986. 5. 15	11.7	7.8	3.9	4.6	2.7	2.4	3.9	3.2	2.7	1.2	1.2
6	1986. 6. 24	189.2	217.3	75.2	111.3	55.2	34.4	61.0	62.0	76.7	12.5	12.9
7	1986. 7. 10	20.3	18.3	7.6	11.9	3.3	5.0	3.6	3.6	5.4	1.6	2.7
8	1986. 7. 20	19.0	9.5	10.2	5.3	6.7	2.4	8.9	8.3	3.1	5.0	2.9
9	1986. 8. 8	13.0	12.7	5.5	8.6	2.3	1.8	3.0	2.1	2.0	1.7	2.1
10	1986. 9. 20	44.2	26.6	16.8	23.0	5.5	4.8	7.5	8.0	10.2	5.3	8.1
11	1986. 10. 14	35.5	27.0	14.7	17.9	6.0	5.2	7.5	7.4	8.0	4.5	4.4
12	1986. 10. 25	20.4	21.2	8.8	11.4	2.7	2.9	4.3	3.3	4.5	2.3	3.0
13	1987. 1. 9	61.1	77.1	24.6	37.6	15.6	14.8	16.2	16.2	24.4	6.9	6.6
14	1987. 1. 27	42.7	41.9	17.3	26.0	9.1	9.0	12.0	10.9	17.8	6.0	4.9
15	1987. 2. 6	92.3	164.8	43.8	98.6	34.2	26.4	39.5	41.6	38.6	16.2	11.5
16	1987. 2. 6	238.3	321.9	108.7	217.7	87.4	53.8	91.4	99.5	103.5	23.4	22.2
17	1987. 2. 11	61.4	55.9	36.4	32.3	10.0	9.1	10.6	14.2	15.8	18.3	12.3
18	1987. 2. 13	48.8	32.3	18.9	19.0	7.3	9.4	9.7	10.6	11.2	6.3	7.5
19	1987. 3. 24	32.5	79.7	14.7	35.9	5.8	4.9	6.3	5.6	8.5	2.7	3.8
20	1987. 4. 7	175.7	246.6	110.3	115.3	80.1	51.8	94.2	87.0	96.3	18.5	25.6
21	1987. 4. 10	51.8	41.7	25.1	28.3	10.3	10.7	11.2	13.7	12.2	6.3	5.4
22	1987. 4. 17	57.4	56.4	23.0	33.0	16.8	10.5	18.8	17.6	17.1	4.4	4.9
23	1987. 4. 17	26.9	19.3	9.0	13.9	3.7	4.4	4.6	5.6	5.4	2.7	2.9
24	1987. 4. 23	68.4	99.4	28.1	64.0	20.8	21.5	26.6	23.4	30.3	8.8	9.8
25	1987. 5. 10	32.7	25.9	9.5	17.8	8.3	6.6	8.5	8.5	11.2	3.7	2.7
26	1987. 5. 17	19.7	23.9	10.7	18.8	6.1	7.3	8.3	8.8	16.6	3.4	3.4
27	1987. 6. 16	14.4	12.9	5.9	8.8	4.2	2.7	4.9	5.1	4.6	2.0	1.5
28	1987. 6. 30	65.9	61.5	24.4	50.5	12.5	23.7	17.6	18.1	13.4	14.4	12.7
29	1987. 7. 12	52.7	30.3	21.5	18.8	8.8	8.8	8.8	10.5	9.0	5.1	5.1
30	1987. 7. 16	29.8	28.6	13.2	16.6	6.6	6.1	8.3	9.5	11.7	2.4	2.4
31	1987. 9. 24	54.0	38.8	23.4	25.1	9.8	8.3	11.7	12.2	11.7	6.3	5.6
32	1987. 10. 4	33.7	21.7	11.0	10.0	4.9	4.4	6.3	6.6	8.5	2.2	2.2
33	1987. 12. 17	446.3	999.8	296.6	470.5	216.3	173.1	256.8	247.1	363.3	99.4	114.3

注) A-4 TR成分は、加速度計の故障のため記録が得られなかった。

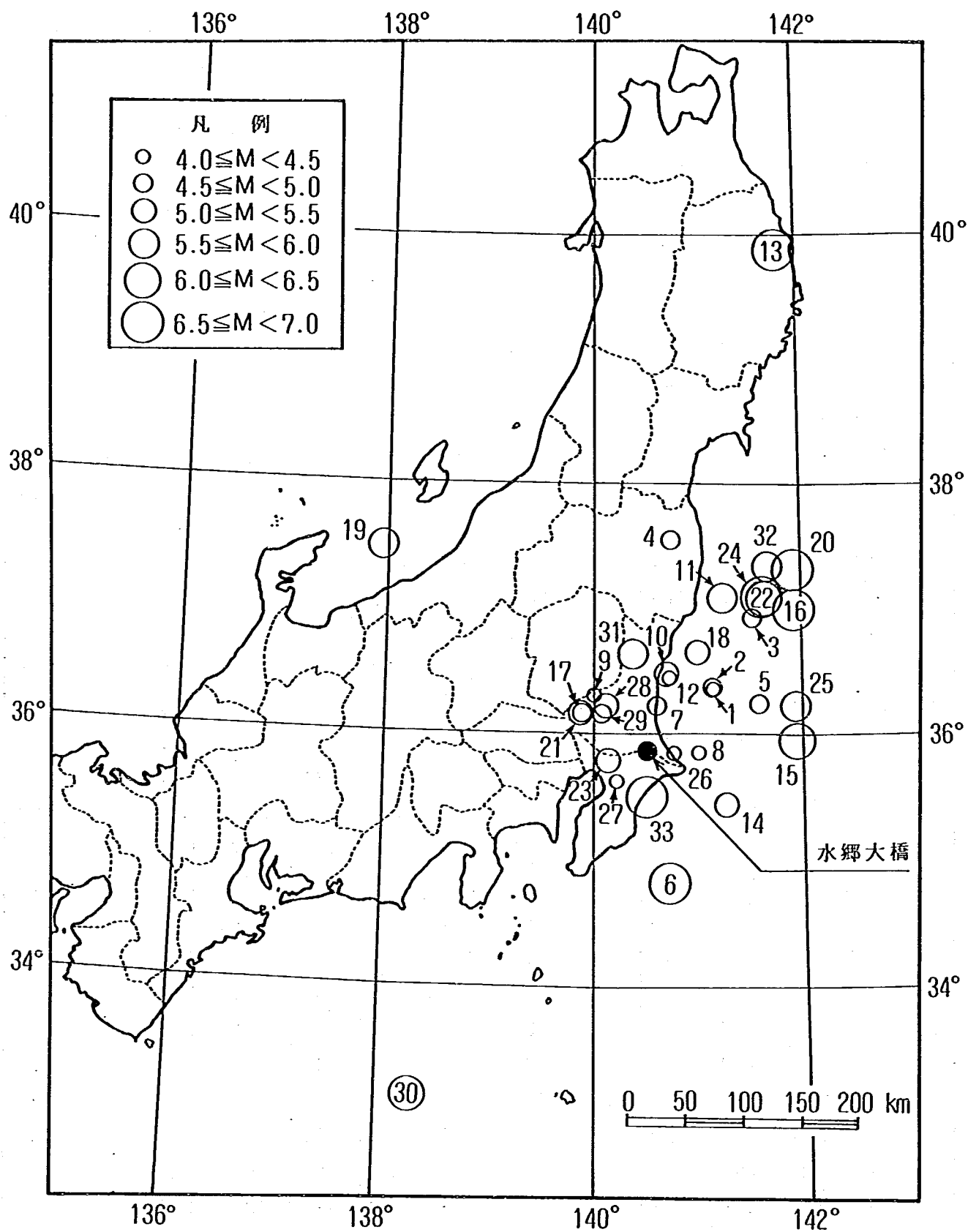


図-3.1 水郷大橋で観測された33地震の震源位置

3.2 強震記録の解析

3.1に示した33地震で得られた記録のうち、観測された加速度が比較的大きいものを選定して、その記録の解析を行った。表-3.3は、解析に用いた地震を示したものであり、これらの地震の震源位置を図-3.2に示す。

図-3.3~図-3.8は、前述の3地震により得られた加速度波形及びそのフーリエスペクトルを示したものである。また、表-3.4は、各観測点で得られた記録の卓越振動数を示したものである。なお、各加速度記録は、30 Hz 以上の高周波成分を除去した後のものである。

各地震で得られた記録の特徴を示すと以下ようになる。

(1) 昭和61年6月24日 房総半島南東沖地震

- 1) 最大加速度の値は、橋軸方向、橋軸直角方向それぞれについて塔頂部では189 gal, 217 gal, 塔基部で55 gal, 34 galである。最大加速度を見た場合、主塔は橋軸直角方向の増幅率が高い。
- 2) 橋軸方向については、1.61 Hz が上下部工全体の1次モード、また、塔の振動モードとして卓越する成分が4.58 Hz である。
- 3) 橋軸直角方向については、塔では5つ程度の振動モードが重なりあった応答を示している。桁は、1.25 Hz の1次振動モードで振動している。
- 4) 地盤の卓越振動数は、橋軸方向に対しては0.82 Hz, 橋軸直角方向に対しては0.92 Hz である。

(2) 昭和62年2月6日 福島県東方沖地震

- 1) 最大加速度の値は、橋軸方向、橋軸直角方向それぞれについて塔頂部で238 gal, 306 gal, 塔基部で87 gal, 53 galである。
- 2) 橋軸方向については、1.67 Hz が上下部工全体の1次振動モード、また、塔の振動が卓越する振動数成分が4.59 Hz である。

塔の卓越振動成分は(1)の房総半島南東沖地震とはほぼ同じであるが、全体の1次振動モードは(1)の地震の方がわずかに小さい振動数となっている。

- 3) 橋軸直角方向については、(1)と同様に5つ程度の振動が重なり合った応答をしている。桁は、1.27 Hz の1次振動モードで振動している。
- 4) 地盤の卓越振動数は、橋軸方向には1.22 Hz, 橋軸直角方向には0.90 Hz である。

(3) 昭和62年12月17日 千葉県東方沖地震

- 1) 最大加速度の値は、橋軸方向、橋軸直角方向それぞれについて、塔頂部で449 gal, 1,008 gal, 塔基部で217 gal, 173 galである。
- 2) 橋軸方向については、1.51 Hz が上下部工全体の1次振動モードであり、他の地震で得られたものよりも6~10%程度小さい。
- 3) 橋軸直角方向については、主塔の卓越振動は、0.72 Hz であり、他の地震のように多数の振動モードが関与していない。
- 4) 地盤の卓越振動数は、橋軸方向、橋軸直角方向共に0.87 Hz である。

(4) 水郷大橋の卓越振動数

- 1) 橋軸方向については、A-2～A-5は、同じ振動数が卓越しており、これは、水郷大橋全体が橋軸方向に変形するモードである。

なお、最も加速度が大きかった千葉県東方沖地震では、A-1～A-5が同じ振動数である。

- 2) 橋軸直角方向については、塔頂部（A-1）は同じ塔の1次の振動数が卓越しているが、塔中間部（A-2）では高次の振動数が卓越している。桁については直角方向1次振動が卓越している。

表-3.3 解析に用いた地震記録

地番	震号	年月日	地震名	東 経	北 緯	震央距離 (Km)	マグニチュード	震源深さ (Km)
EQ-6		1986. 6. 24	房総半島南東沖地震	140° 43'	34° 49'	123	6.5	73
EQ-16		1987. 2. 6	福島県東方沖地震	141° 54'	36° 59'	173	6.7	31
EQ-33		1987. 12. 17	千葉県東方沖地震	140° 29'	35° 21'	62	6.7	58

表-3.4 各観測点で得られた記録の卓越振動数 (Hz)

観測点 地震名	橋 軸 方 向						橋 軸 直 角 方 向				
	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-1	A-2	A-3	A-5	A-6
房総半島南東沖地震	4.58	1.61	1.61	1.61	1.61	0.82	0.73	5.26	2.81	1.25	0.92
福島県東方沖地震	4.59	1.67	1.67	1.67	1.67	1.22	0.72	5.33	0.98	1.27	0.90
千葉県東方沖地震	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	0.87	0.72	0.72	0.87	1.22	0.87

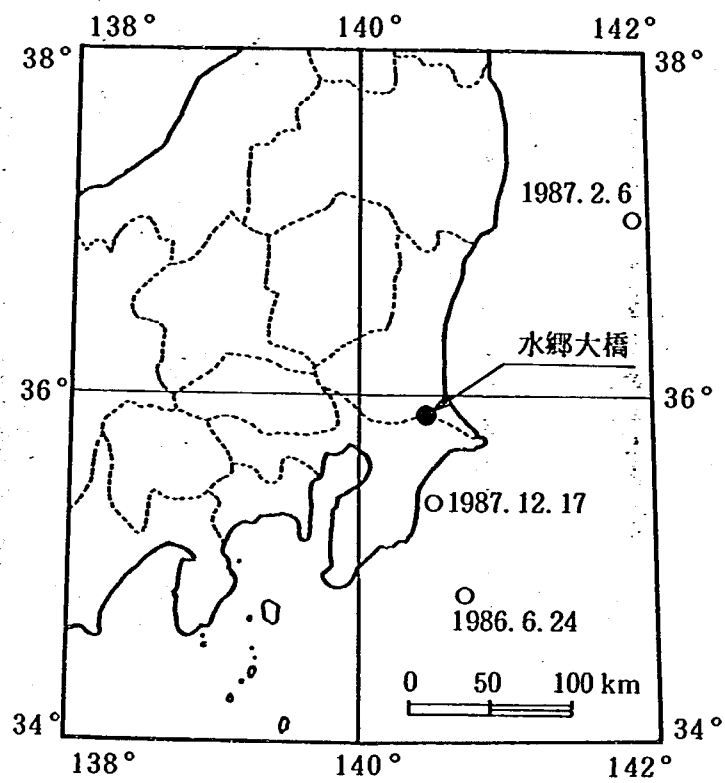
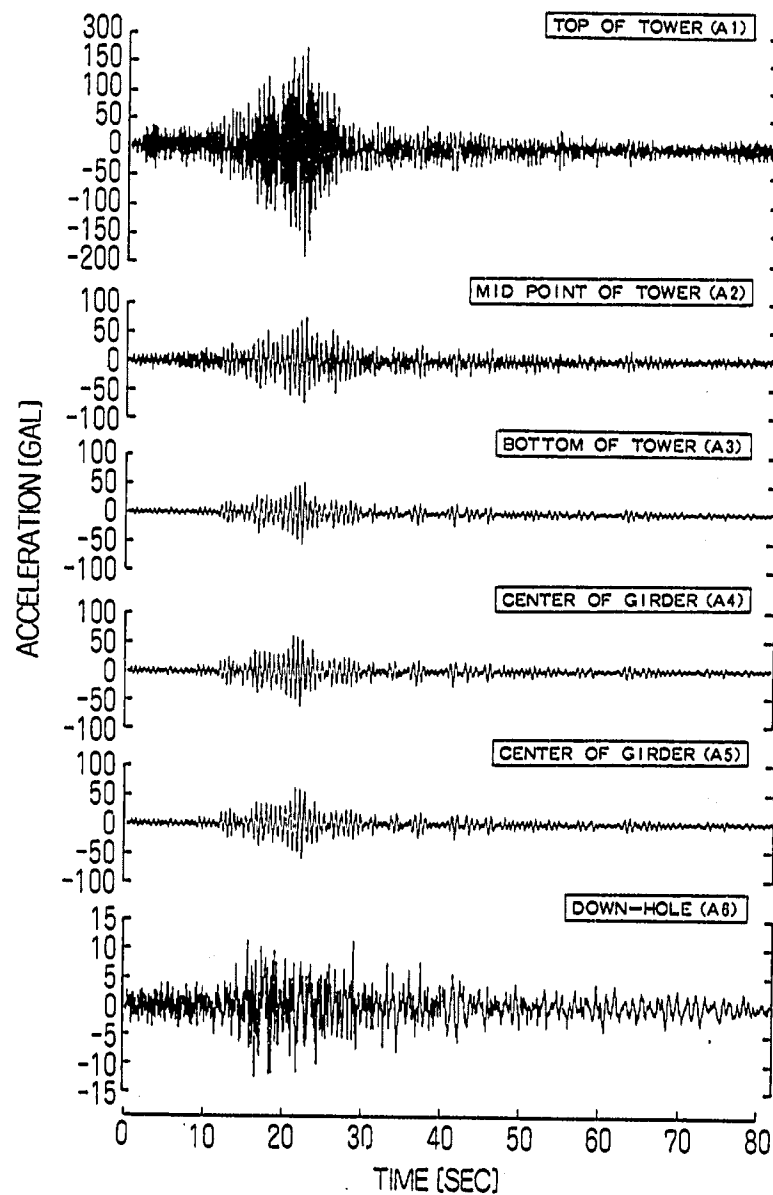
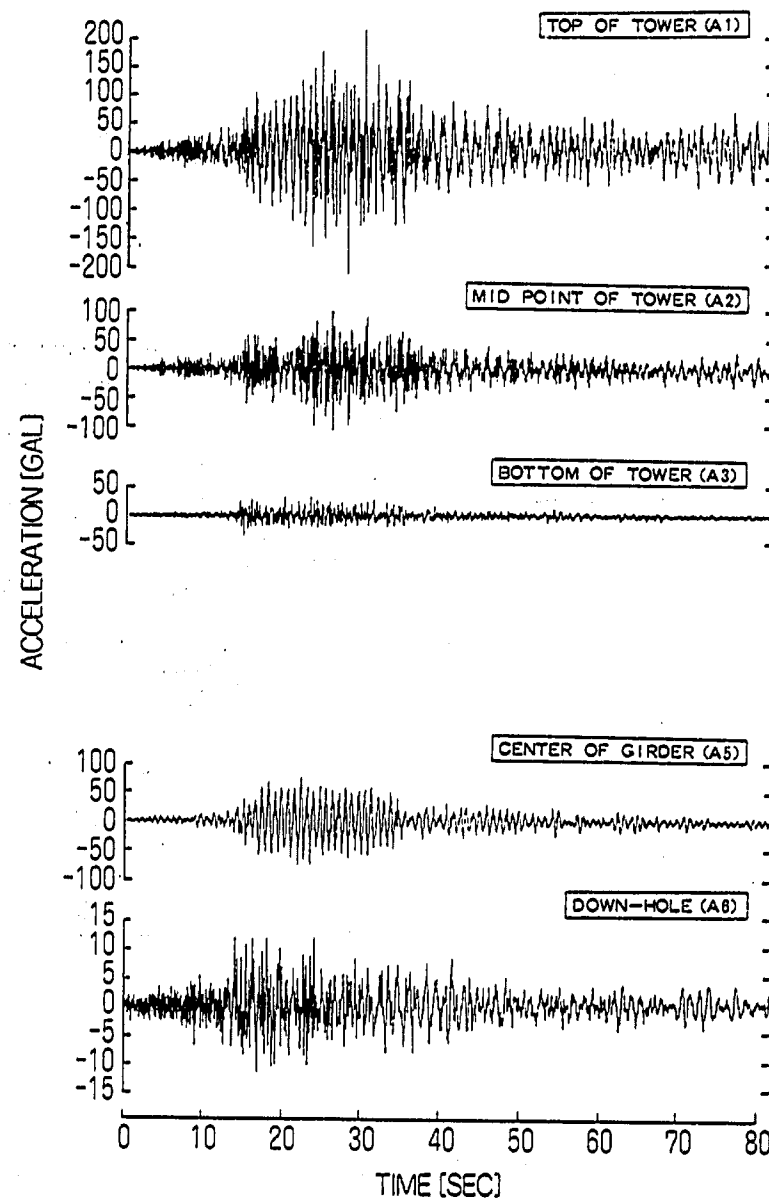


図- 3. 2 解析に用いた 3 地震の震源位置

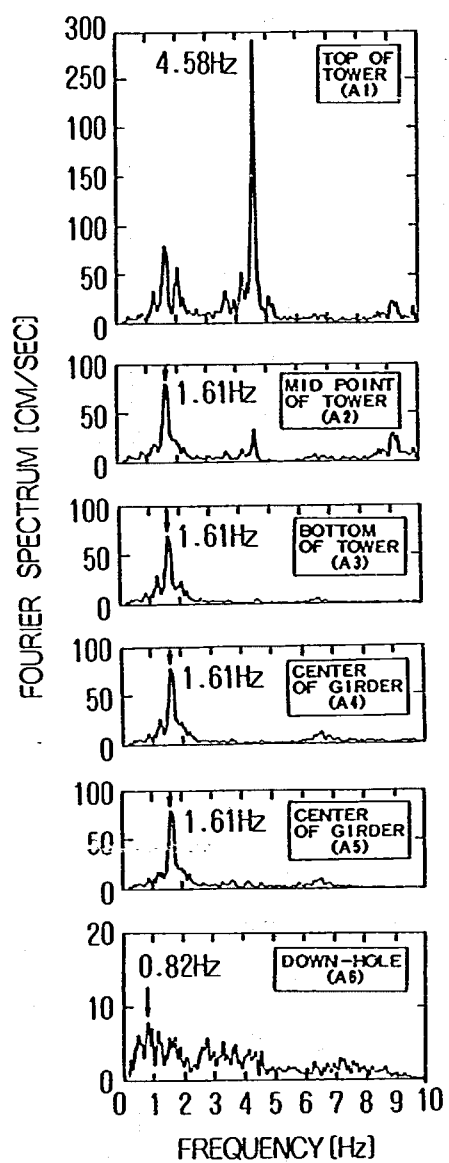


(a) LONGITUDINAL DIRECTION

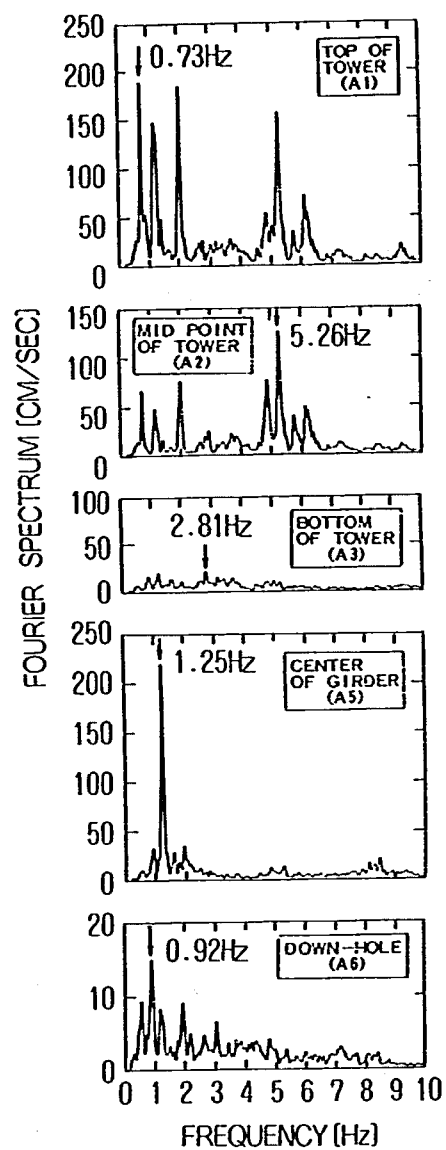


(b) TRANSVERSE DIRECTION

図-3.3 昭和61年6月24日房総半島南東沖地震 (EQ-7) により得られた加速度波形

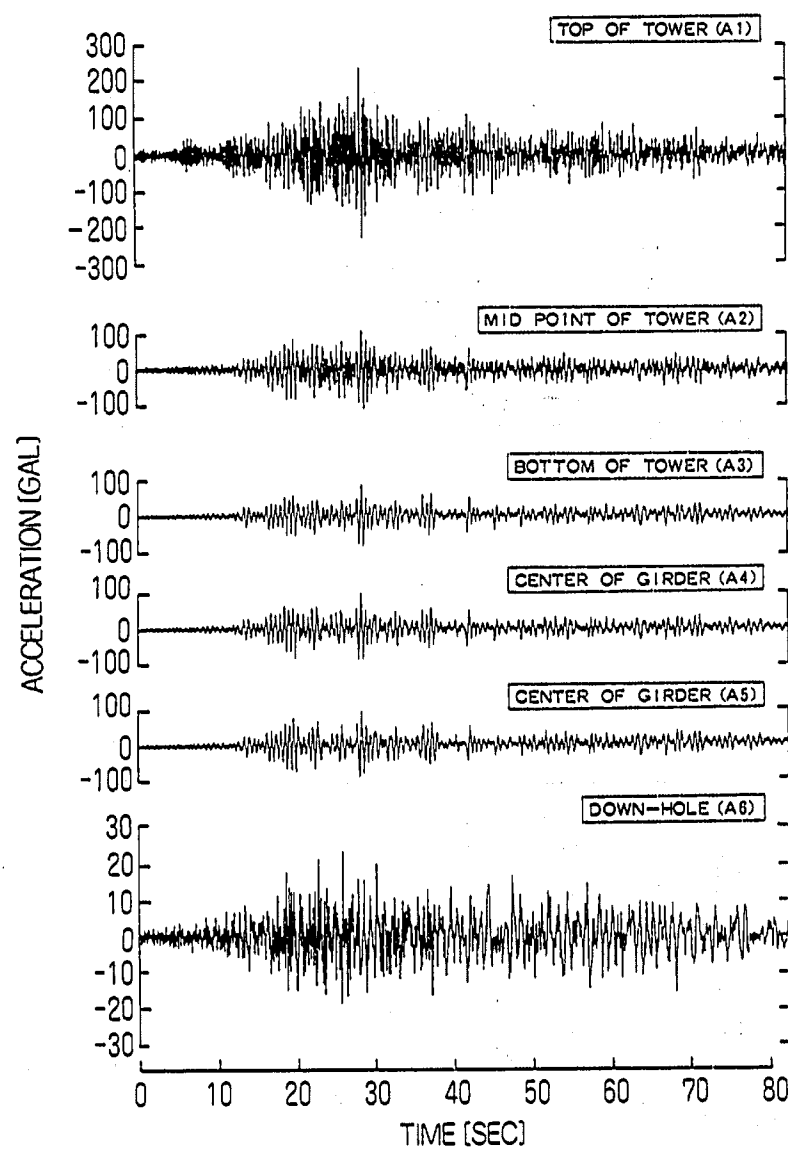


(a) LONGITUDINAL DIRECTION

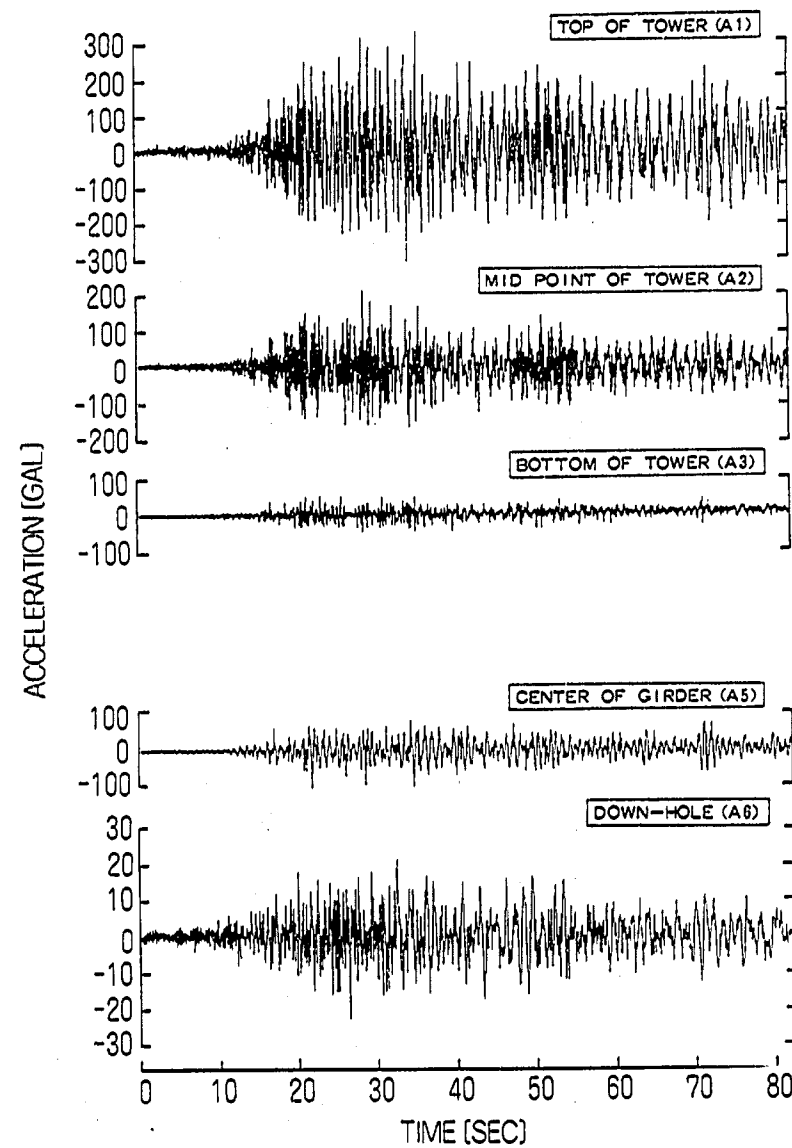


(b) TRANSVERSE DIRECTION

図-3.4 昭和61年6月24日房総半島南東沖地震により得られた加速度記録のフーリエスペクトル

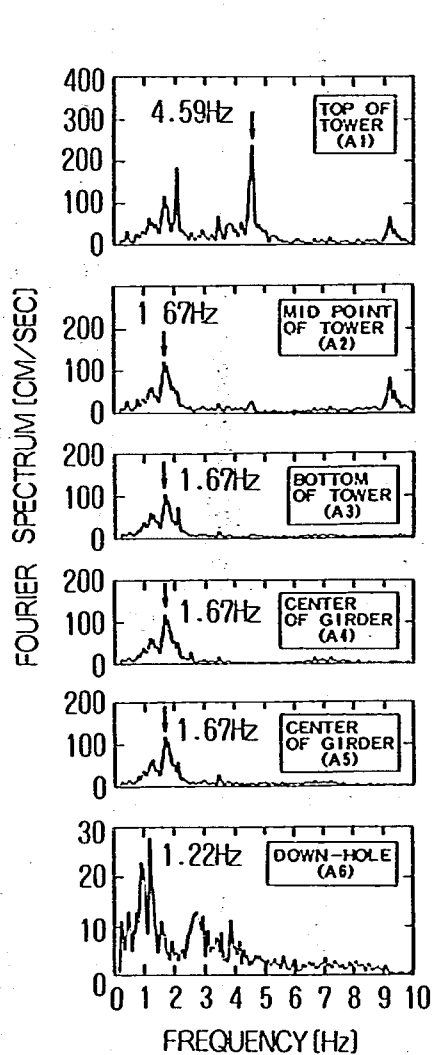


(a) LONGITUDINAL DIRECTION

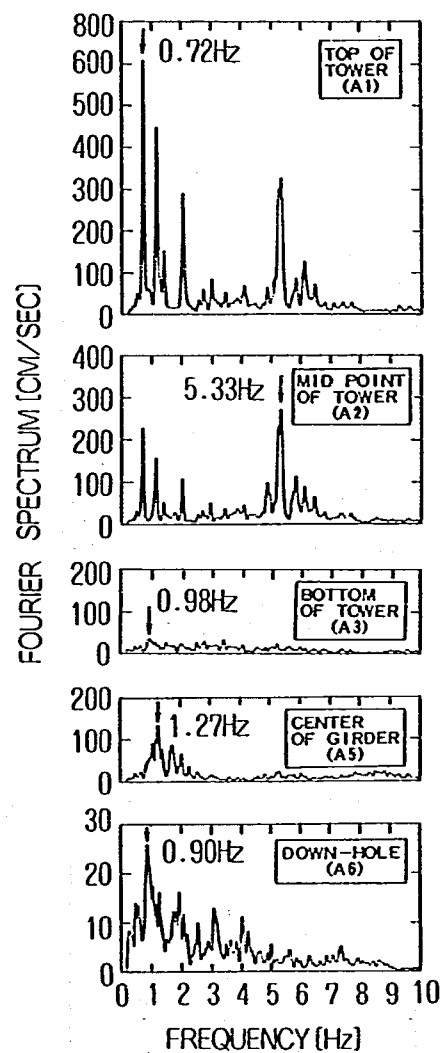


(b) TRANSVERSE DIRECTION

図-3.5 昭和62年2月6日福島県東方沖地震 (EQ-17) により得られた加速度波形

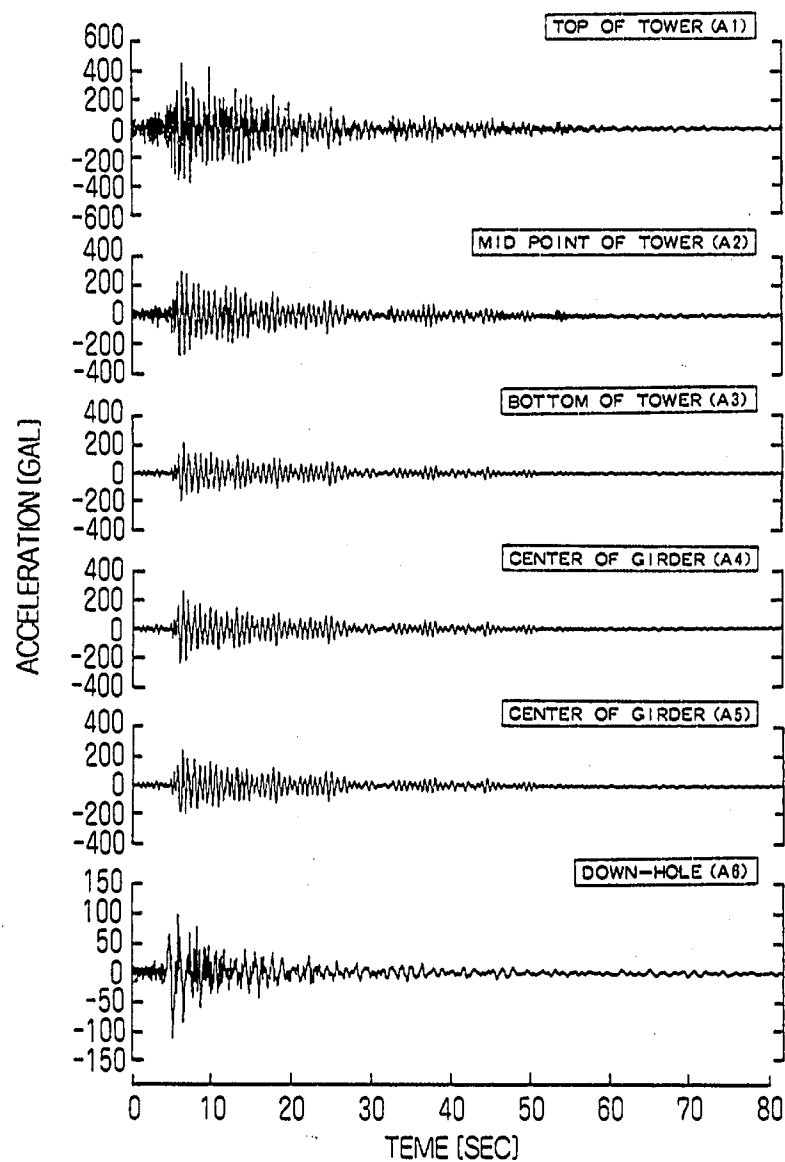


(a) LONGITUDINAL DIRECTION

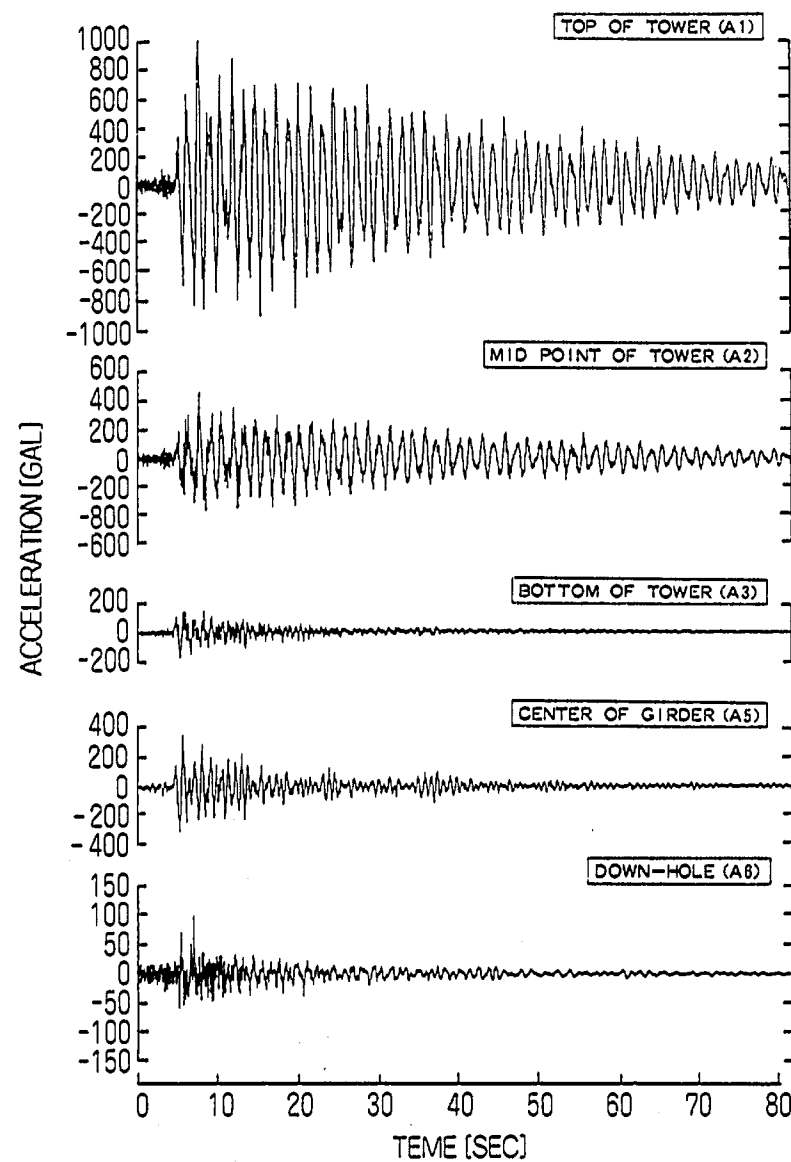


(b) TRANSVERSE DIRECTION

図-3.6 昭和62年2月6日福島県東方沖地震により得られた加速度記録のフーリエスペクトル

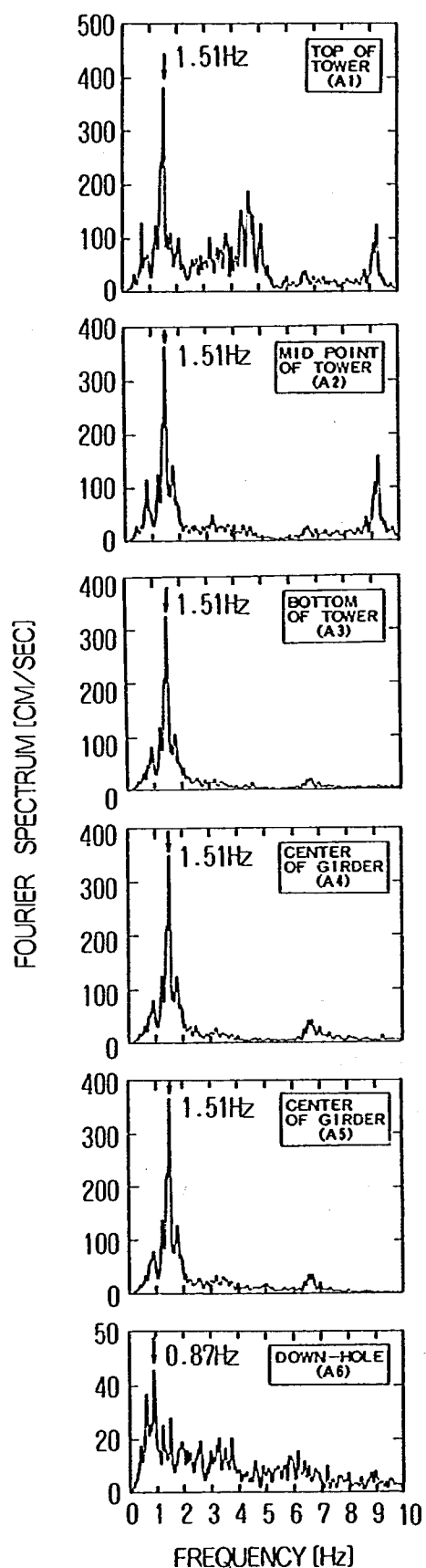


(a) LONGITUDINAL DIRECTION

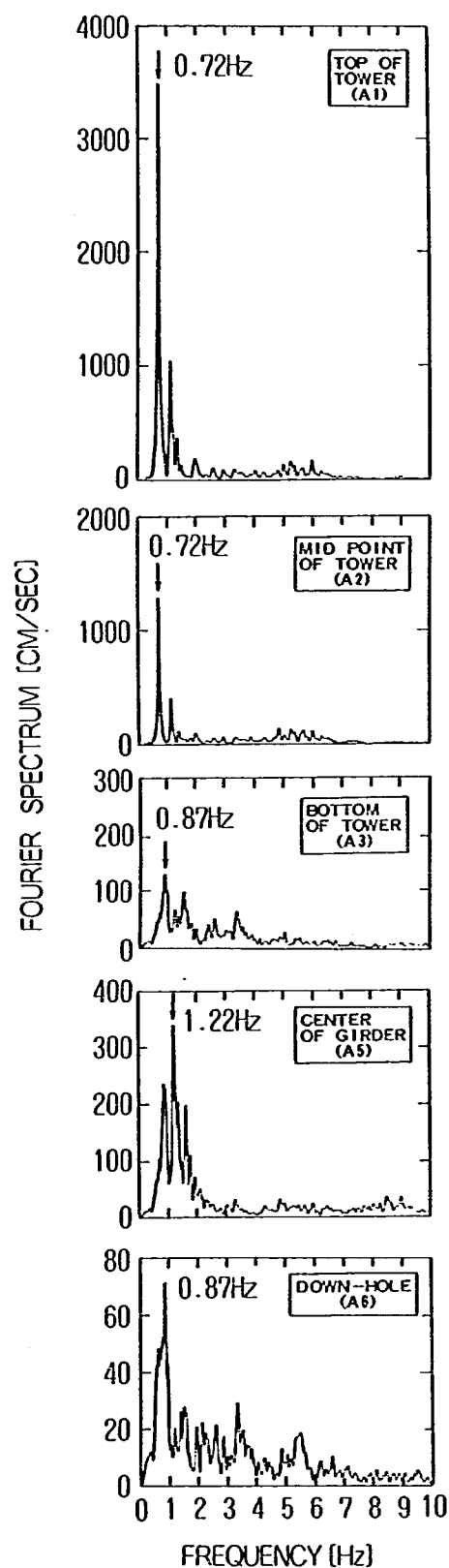


(b) TRANSVERSE DIRECTION

図-3.7 昭和62年12月17日千葉県東方沖地震 (EQ-34) により得られた加速度波形



(a) LONGITUDINAL DIRECTION



(b) TRANSVERSE DIRECTION

図-3.8 昭和62年12月17日千葉県東方沖地震により得られた加速度記録のフーリエスペクトル

4. 水郷大橋の動的解析

4.1 解析モデル

水郷大橋で観測された加速度記録を用いて、水郷大橋上部工の減衰定数を推定することを目的とした動的解析を行った。

水郷大橋の上部工のみを対象とし、図-4.1に示すような多質点の骨組構造としてモデル化した。モデルの作成に際して、部材の分割は、桁部10m/1部材、塔部5m/1部材、ケーブル20m/1部材程度とした。モデルの節点数及び部材数は、それぞれ61節点、66部材である。

解析では、2次元平面モデルを仮定し、橋軸方向、橋軸直角方向それぞれについて応答計算を行った。

なお、橋軸方向モデルに対してはケーブルにマスを考慮したが、橋軸直角方向については、2次元平面モデルであること、及びケーブルの曲げ剛性が小さいことからケーブルマスは考慮しなかった。

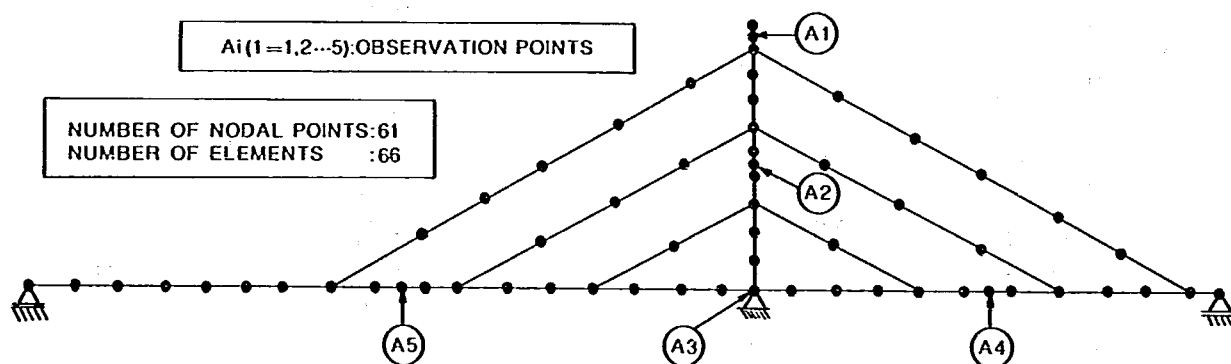


図-4.1 解析モデル

4.2 固有値解析結果

(1) 解析モデルによる固有値解析結果

4.1に示した解析モデルの固有値解析結果を表-4.1及び表-4.2に示す。このうち、有効質量の大きい固有振動モード形を図-4.2及び図-4.3に示す。

塔の橋軸方向の振動が卓越する振動次数は、23次4.58 Hzである。橋軸直角方向に対しては、0.74 Hzが塔の1次振動モード、1.27 Hzが桁の1次振動モードである。

なお、3.2に示した昭和62年12月17日千葉県東方沖地震においては水郷大橋の卓越振動数として、橋軸方向には1.51 Hzが得られているが、固有値解析では得られていない。これは、この振動数は図-4.4に示すような上部工全体の振動モードであり、上部工のみをモデル化した解析では得られなかった。このため、主塔基部に下部工に相当するばね要素を仮定した時の固有値解析結果及び振動モードを表-4.2及び図-4.5に示す。これによれば、ばね要素として48,500t/mを仮定すれば上部工全体が剛体変形を行う振動モードを1.52 Hzで得ることができる。

(2) 強震記録に基づく固有振動モード形

強震観測記録をもとに水郷大橋で卓越する固有振動モード形を求めた。対象とした強震記録は、3.2に示した昭和62年12月17日千葉県東方沖地震(EQ-33)により得られた記録である。図-3.8に示したフーリエスペクトルに基づき、卓越する振動数回りにバンドパスフィルターをかけることにより、卓越振動数成分を抽出し、その加速度波形から振動モード形を求めた。

図-3.8によれば、卓越振動数としては、橋軸方向に対し、1.51 Hz、及び4.60 Hz、橋軸直角方向に対しては、0.72 Hz、1.22 Hz、5.26 Hzに着目してある振動数の幅でバンドパスフィルター処理をした。なお、バンドパスの幅は、各卓越振動成分に応じて他の振動モードが含まれないように表-4.4のようにとった。

このようにして求められた波形及びフーリエスペクトルの一例を示すと図-4.6及び図-4.7のようになる。

バンドパス処理後の波形をもとに、ある時刻の加速度から振動モードを求めた。各種時刻における加速度値を表-4.5及び表-4.6に示すが、これより得られる振動モードはほぼ同じ形状となり、これを図示したのが、図-4.8及び図-4.9である。

橋軸方向については、4.60 Hzが解析による23次(4.58 Hz)とほぼ一致しており、橋軸直角方向については、0.72 Hzが解析による1次(0.74 Hz)、1.22 Hzが2次(1.27 Hz)、5.26 Hzが10次(5.09 Hz)にそれぞれ対応するものと考えられる。

表-4.1 固有値解析結果 (橋軸方向)

振動次数	振 動 数 (Hz)	周 期 (秒)	刺 激 係 数		有効質量 ($t \cdot \text{sec}^2/m$)	
			橋 軸 方 向	上 下 方 向	橋 軸 方 向	上 下 方 向
1	0.42	2.378	0.06	-7.33	0.0	53.8
2	0.44	2.252	-0.47	-3.18	0.2	10.1
3	0.45	2.216	1.11	3.02	1.2	9.1
4	0.77	1.304	0.40	6.51	0.2	42.3
5	0.77	1.295	-0.47	0.75	0.2	0.6
6	0.81	1.241	-0.60	10.87	0.4	118.2
7	1.20	0.834	-0.12	6.35	0.0	40.3
8	1.22	0.822	0.06	0.05	0.0	0.0
9	1.24	0.803	0.13	-7.77	0.0	60.3
10	1.97	0.509	-0.05	5.34	0.0	28.6
11	2.05	0.487	0.07	-0.04	0.0	0.0
12	2.06	0.486	-0.02	1.48	0.0	2.2
13	2.15	0.465	0.17	1.07	0.0	1.1
14	2.16	0.463	-0.40	-0.64	0.2	0.4
15	2.34	0.428	-0.40	0.29	0.2	0.1
16	2.35	0.426	-0.42	0.51	0.2	0.3
17	2.58	0.387	0.12	-3.31	0.0	10.9
18	3.37	0.297	0.43	0.14	0.2	0.0
19	3.38	0.296	-0.16	-0.03	0.0	0.0
20	3.51	0.285	0.51	0.81	0.3	0.7
21	3.62	0.276	-0.04	-0.19	0.0	0.0
22	3.63	0.275	-0.15	-0.09	0.0	0.0
23	4.58	0.218	-15.63	-0.18	244.3	0.0
24	4.62	0.217	3.81	-0.39	14.5	0.2
25	4.63	0.216	4.73	0.45	22.4	0.2
26	5.00	0.200	1.50	1.51	2.3	2.3
27	5.54	0.181	-0.22	-5.15	0.0	26.5
28	6.51	0.154	6.07	-0.73	36.8	0.5
29	7.48	0.134	-1.55	-0.67	2.4	0.5
30	8.31	0.120	8.63	-0.38	74.6	0.1

表一4.2 固有值解析結果 (橋軸直角方向)

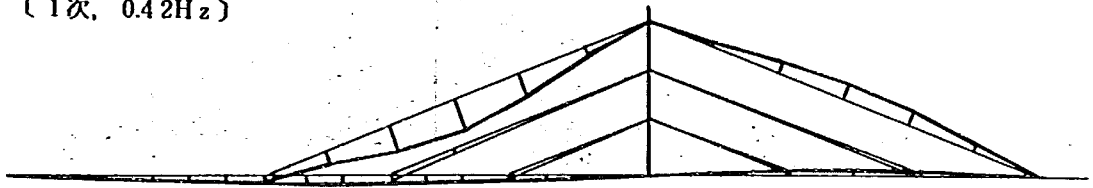
振動次数	振動数 (Hz)	周期 (秒)	刺激係 数	有効質量(t·sec ² /m)
1	0.74	1.35	4.99	24.9
2	1.27	0.789	12.16	147.9
3	1.63	0.613	-0.01	0.0
4	2.58	0.388	0.01	0.0
5	3.20	0.313	0.20	0.0
6	3.20	0.312	12.49	156.1
7	4.68	0.214	2.57	6.6
8	4.80	0.209	0.02	0.0
9	4.96	0.202	5.48	30.1
10	5.09	0.197	0.01	0.0
11	6.34	0.158	0.00	0.0
12	7.48	0.134	0.00	0.0
13	7.80	0.128	0.00	0.0
14	9.24	0.108	-0.00	0.0
15	9.69	0.103	5.10	26.0
16	9.73	0.103	-0.01	0.0
17	10.55	0.095	0.00	0.0
18	11.74	0.085	-0.00	0.0
19	11.76	0.085	-0.00	0.0
20	12.37	0.081	3.01	9.0
21	12.56	0.080	-1.17	1.4
22	12.81	0.078	1.50	2.3
23	12.90	0.078	0.01	0.0
24	13.60	0.074	-0.00	0.0
25	13.94	0.072	-0.00	0.0
26	14.86	0.067	-0.00	0.0
27	15.05	0.066	-0.00	0.0
28	15.49	0.065	-0.00	0.0
29	15.93	0.063	0.00	0.0
30	15.94	0.063	0.00	0.0

表-4.3 固有値解析結果 (橋軸方向、塔基部にばね要素を仮定した場合)

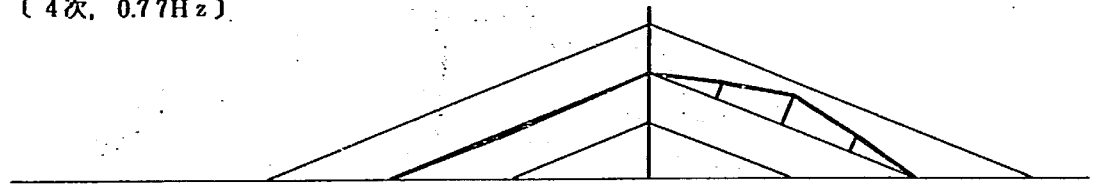
振動次数	振 動 数 (Hz)	周 期 (秒)	刺 激 係 数		有効質量 ($t \cdot sec^2/m$)	
			橋軸方向	上下方向	橋軸方向	上下方向
1	0.42	2.378	0.07	-7.33	0.0	53.7
2	0.44	2.253	0.52	3.19	0.3	10.2
3	0.45	2.216	1.21	3.01	1.5	9.1
4	0.767	1.304	0.53	6.48	0.3	42.0
5	0.772	1.295	0.62	-0.83	0.4	0.7
6	0.81	1.241	-0.81	10.88	0.7	118.4
7	1.20	0.834	-0.31	6.35	0.1	40.4
8	1.22	0.822	-0.15	-0.06	0.0	0.0
9	1.24	0.803	-0.37	7.76	0.1	60.2
10	1.52	0.657	22.08	0.27	487.4	0.0
11	1.97	0.509	-0.06	-5.35	0.0	28.6
12	2.05	0.487	0.07	0.04	0.0	0.0
13	2.06	0.486	0.02	1.48	0.0	2.2
14	2.15	0.465	0.13	-1.05	0.0	1.1
15	2.16	0.463	-0.33	0.66	0.1	0.4
16	2.338	0.428	0.23	0.27	0.1	0.1
17	2.347	0.426	0.26	0.52	0.1	0.3
18	2.584	0.387	0.0	3.31	0.0	11.0
19	3.37	0.297	-0.06	0.13	0.0	0.1
20	3.38	0.296	-0.24	0.03	0.0	0.0
21	3.51	0.285	0.06	-0.80	0.0	0.6
22	3.62	0.276	0.00	0.19	0.0	0.0
23	3.63	0.275	0.02	-0.09	0.0	0.0
24	4.62	0.217	-0.02	0.29	0.0	0.1
25	4.63	0.216	-0.01	-0.51	0.0	0.3
26	4.99	0.200	-0.06	-1.48	0.0	2.2
27	5.54	0.181	0.03	5.12	0.0	26.2
28	5.92	0.169	-0.73	0.96	0.5	0.9
29	7.12	0.140	-0.48	-0.34	0.2	0.1
30	7.52	0.133	-0.14	0.68	0.0	0.5

注) 塔基部の橋軸方向ばね係数は $K_x = 48,500 t/m$ とした。

(1次, 0.42Hz)



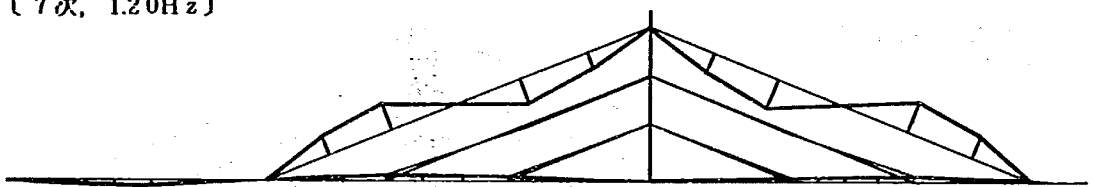
(4次, 0.77Hz)



(6次, 0.81Hz)



(7次, 1.20Hz)



(9次, 1.24Hz)

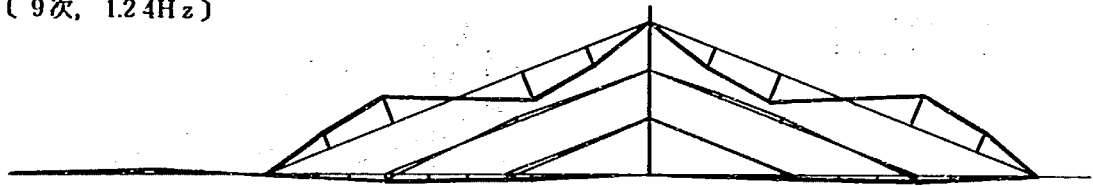
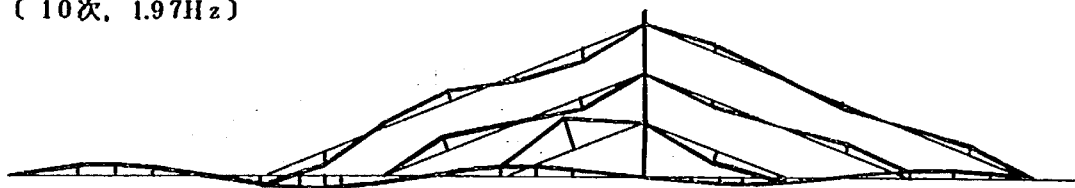
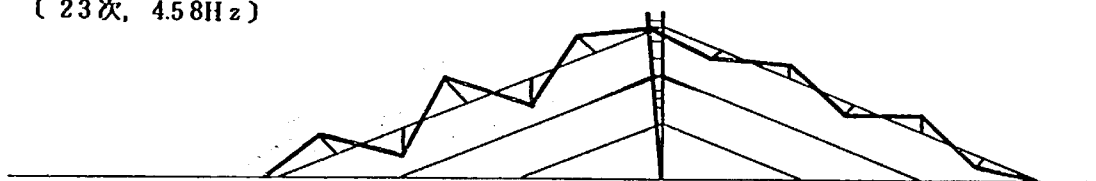


図-4.2 (1) 橋軸方向振動モード

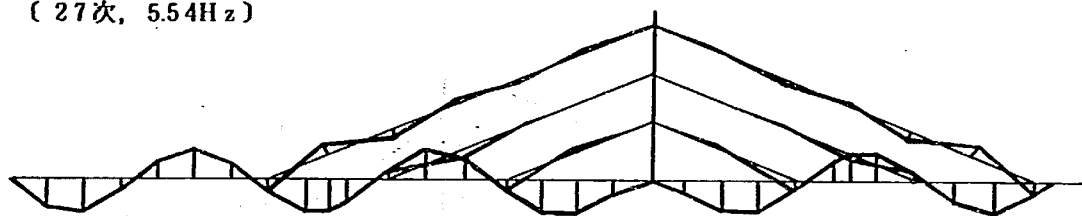
(10 次, 1.97Hz)



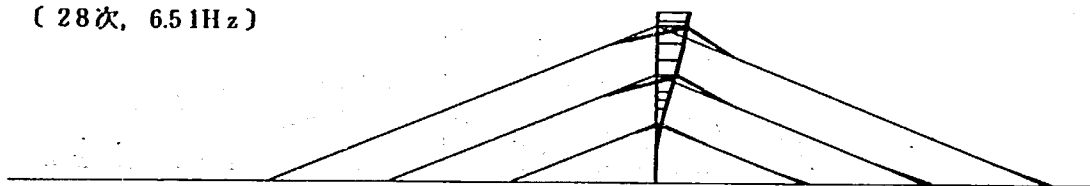
(23 次, 4.58Hz)



(27 次, 5.54Hz)



(28 次, 6.51Hz)



(30 次, 8.31Hz)

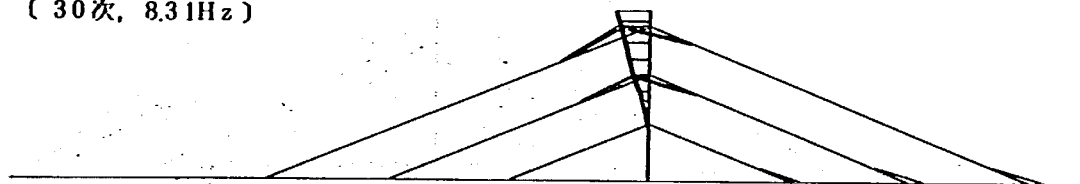


図-4.2 (2) 橋軸方向振動モード

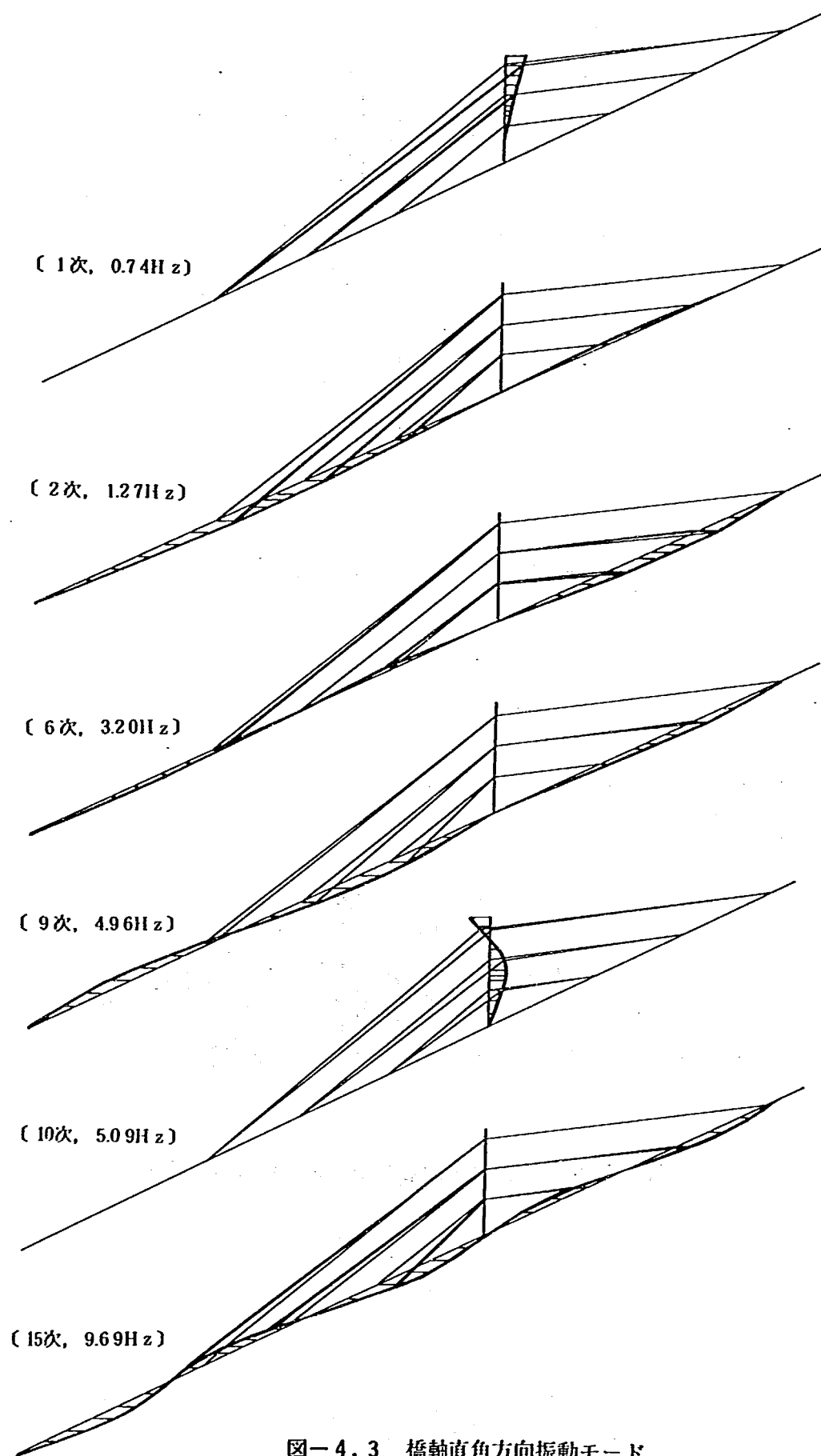
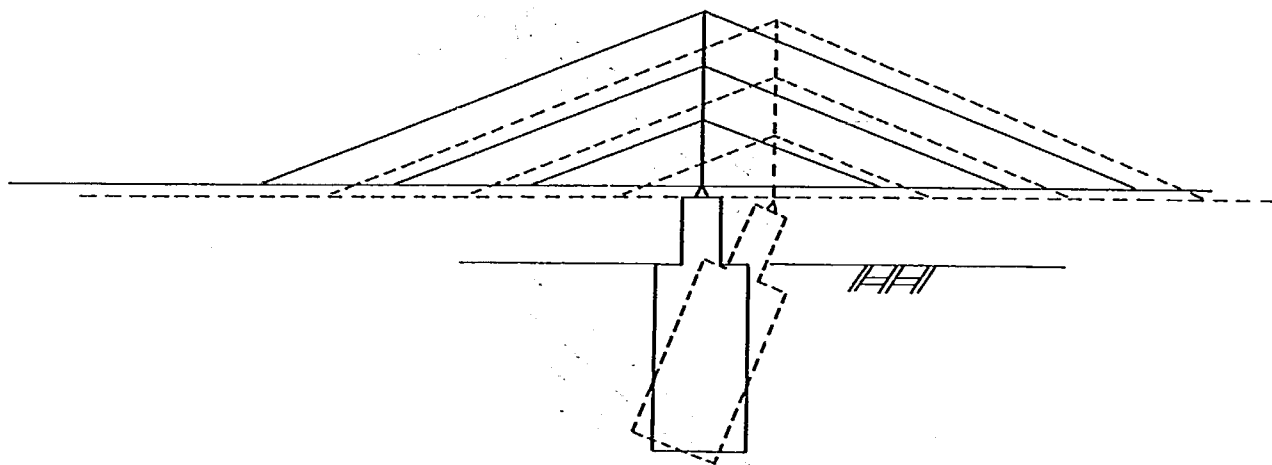
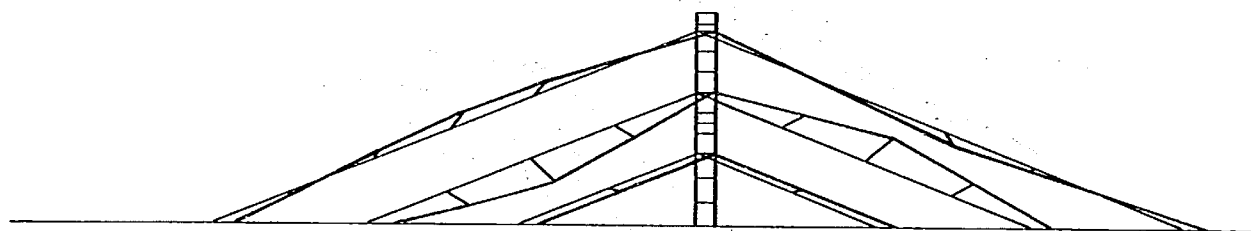


図-4.3 橋軸直角方向振動モード



図－４．４ 上下部工全体の振動モード形



図－４．５ 上部工の剛体振動モード（４次、１．５２秒）

表-4.4 卓越振動数ごとのバンドパス振動数

方向	卓越振動数 (Hz)	バンドパスフィルターの範囲(Hz)
橋軸方向	1.51	1.31 ~ 1.71
	4.60	4.20 ~ 5.00
橋軸直角方向	0.72	0.52 ~ 0.92
	1.22	0.92 ~ 1.52
	5.26	1.76 ~ 5.76

表-4.5 橋軸方向卓越振動数成分の各種時刻における加速度値

(a) 1.51 Hz

時刻秒 観測点	7.08	7.77	8.47	23.74	24.42	25.11	44.00	44.65	45.31
A ₁	129.60	132.89	132.53	75.25	73.63	61.15	28.46	31.00	28.18
A ₂	119.58	121.19	120.80	76.90	71.92	54.72	29.15	32.23	28.98
A ₃	113.61	114.96	113.60	70.23	66.22	51.30	25.85	28.88	26.05
A ₄	119.96	121.67	120.53	75.82	70.76	53.71	28.28	31.53	28.27
A ₅	121.47	124.83	125.19	20.29	76.79	59.17	29.04	32.07	28.41

(単位: gal)

(b) 4.60 Hz

時刻秒 観測点	4.72	4.93	5.15	13.95	14.16	14.38	33.52	33.73	33.94
A ₁	107.54	113.60	109.84	108.12	114.79	116.79	39.78	39.74	36.60
A ₂	8.02	10.54	10.44	15.30	17.27	17.29	5.64	5.62	4.81
A ₃	-3.09	-2.93	-3.51	-3.75	-3.20	-3.42	-0.24	-0.68	-1.25
A ₄	-4.23	-3.50	-3.36	-3.44	-2.59	-2.11	-0.03	-0.18	-0.47
A ₅	-8.49	-6.99	-5.37	-3.43	-2.38	-3.25	0.42	0.72	0.41

(単位: gal)

表-4.6 橋軸直角方向卓越振動数成分の各種時刻における加速度値

(a) 0.72 Hz

時刻秒 観測点	6.29	7.62	8.98	14.65	16.05	17.46	34.55	35.95	37.38
A ₁	527.04	698.64	608.48	595.17	572.90	537.71	443.16	402.08	336.91
A ₂	157.74	225.18	213.77	205.33	204.74	199.63	159.90	146.56	128.95
A ₃	-43.99	-36.38	-7.97	13.52	3.69	6.05	-0.34	1.60	8.89
A ₅	-74.24	-66.73	-12.86	-18.52	-4.01	15.80	-2.99	0.24	14.04

(単位: gal)

(b) 1.22 Hz

時刻秒 観測点	11.14	11.98	12.78	19.27	20.07	20.86	54.85	55.71	56.57
A ₁	249.62	321.76	286.84	211.87	273.12	207.72	107.47	102.17	69.56
A ₂	99.21	95.31	58.27	72.79	78.86	60.33	42.26	40.94	33.20
A ₃	13.80	-18.03	-41.98	-5.61	-24.21	-15.86	1.25	2.01	6.39
A ₅	-95.19	-138.21	-166.98	-43.61	-23.93	0.09	4.72	9.30	15.38

(単位: gal)

(c) 5.26 Hz

時刻秒 観測点	2.76	8.95	9.14	12.31	12.50	12.69	29.75	29.94	30.13
A ₁	106.95	118.16	112.92	90.22	91.36	79.13	60.20	62.31	60.89
A ₂	-83.75	-91.01	-84.66	-92.10	-96.75	-84.34	-47.05	-50.51	-50.48
A ₃	-7.20	-7.13	-5.39	-0.65	-2.35	-2.09	-3.65	-3.09	-2.12
A ₅	3.60	-0.32	-4.50	4.00	3.69	0.57	5.91	5.15	4.07

(単位: gal)

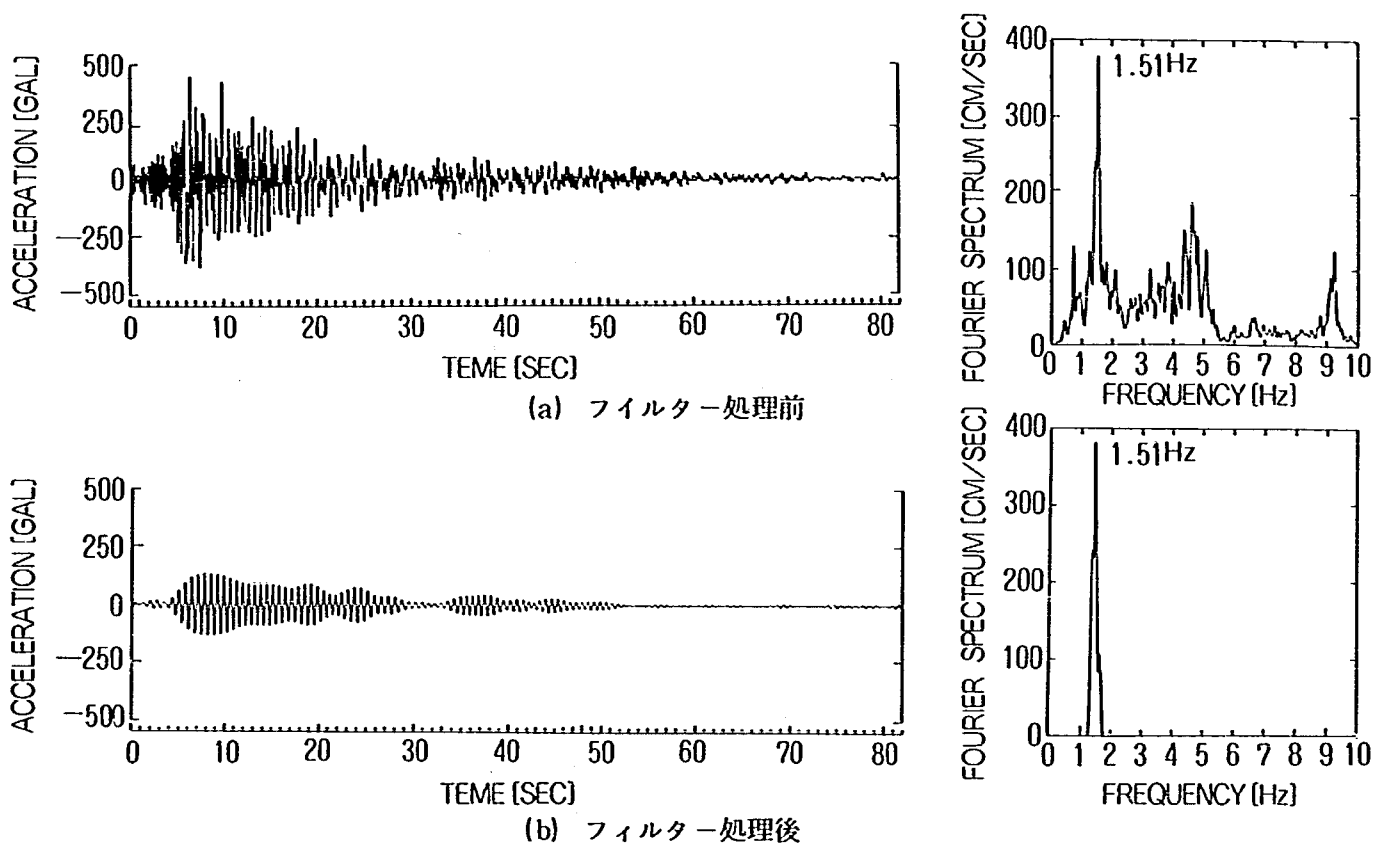


図-4.6 塔頂部橋軸方向 (A-1) のフーリエスペクトル及び波形

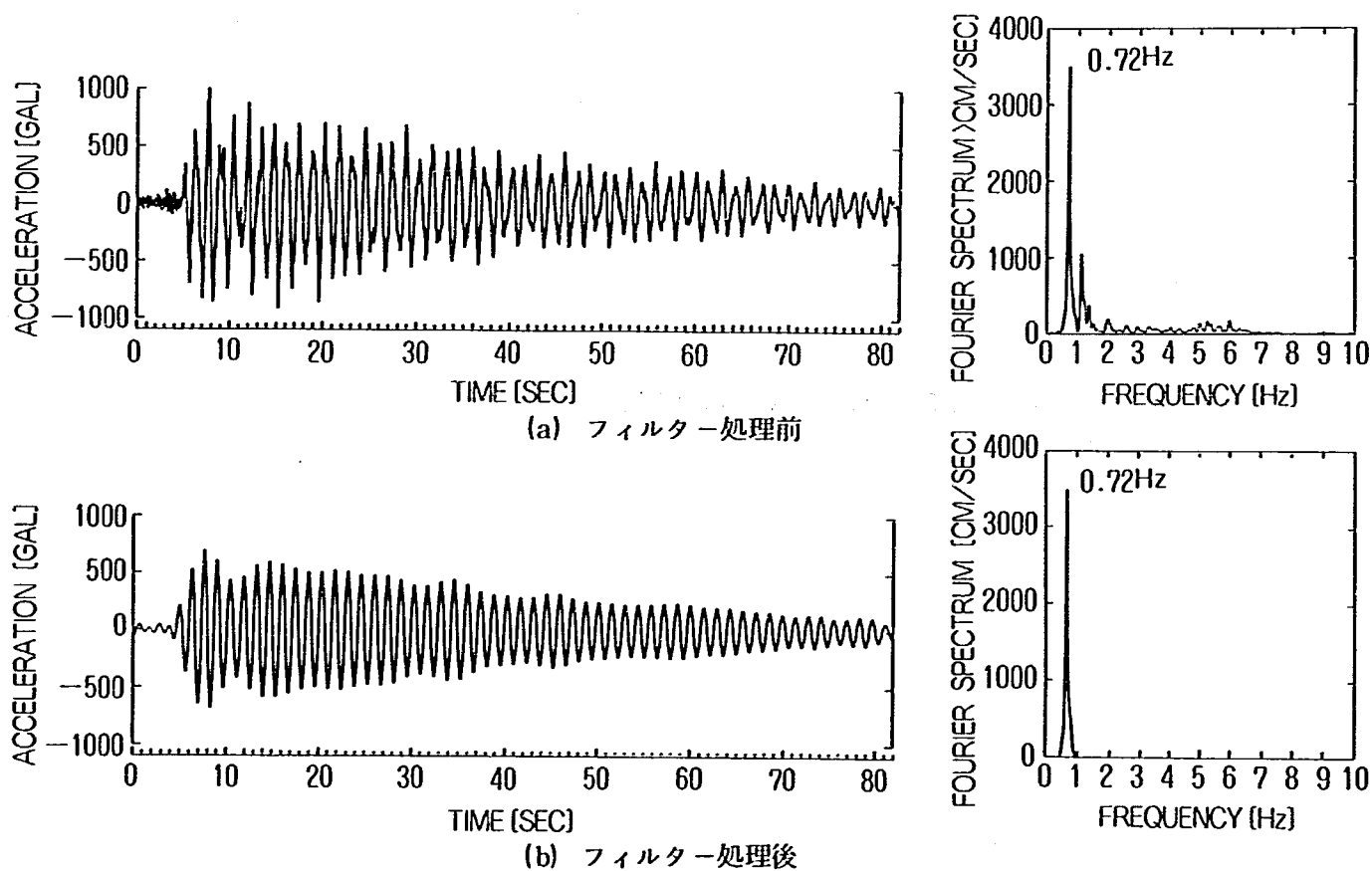
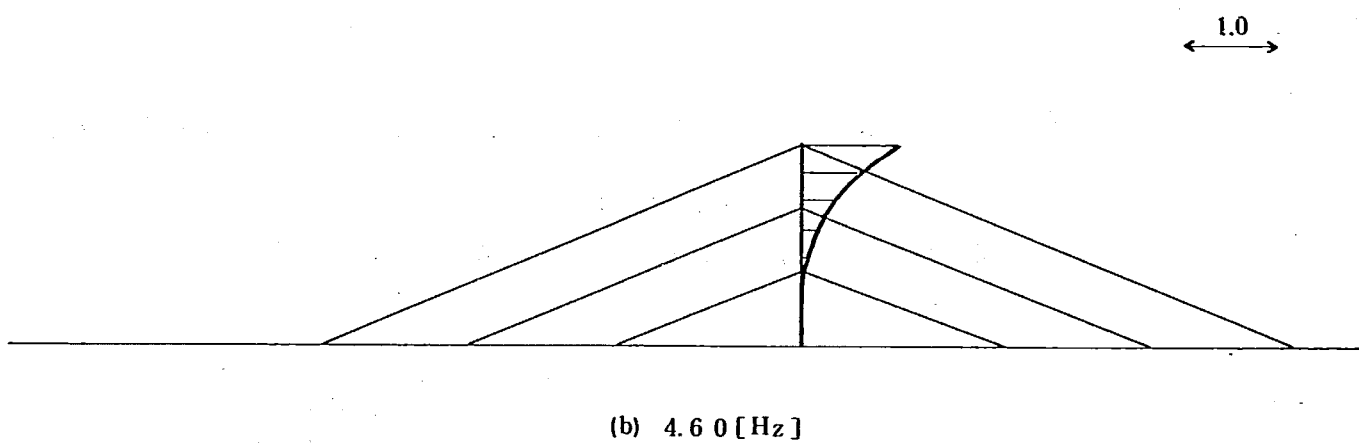
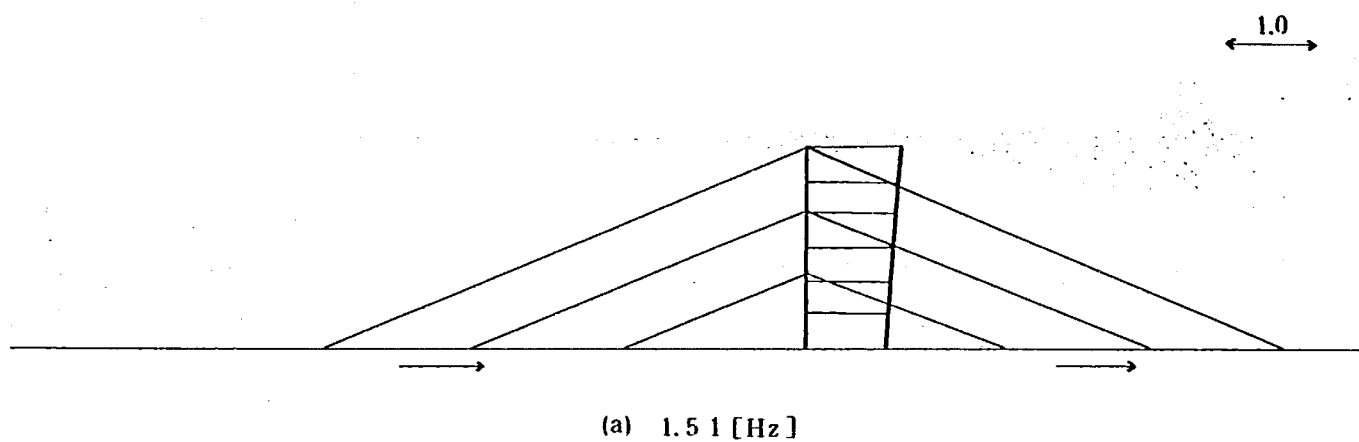


図-4.7 塔頂部橋軸直角方向 (A-2) のフーリエスペクトル及び波形



図一 4. 8 観測記録から求めた橋軸方向振動モード形

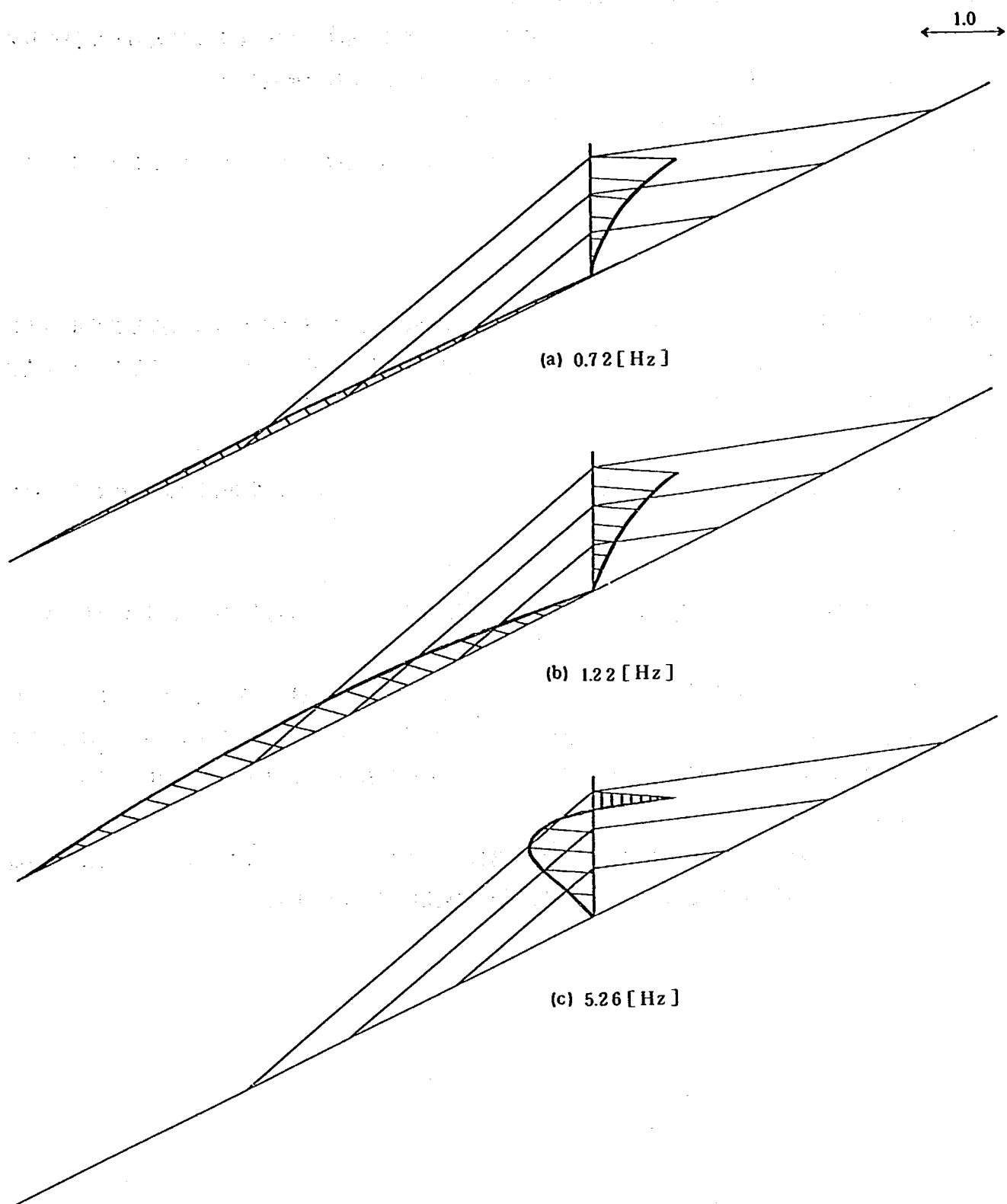


図-4.9 観測記録から求めた橋軸直角方向振動モード形

4.3 動的解析による水郷大橋上部工の減衰定数の推定

主塔基部(A3)で観測された加速度波形を入力加速度として4.1に示した解析モデルに入力して得られる計算波形と観測波形の比較を行うとともに、水郷大橋上部工の減衰定数を推定した。

解析に用いた地震記録は、3.2に示した3地震による記録である。

解析は、モーダルアナリシスによる時刻歴応答解析とし、減衰定数は全モードに対して0, 1, 2, 5%の4種類を仮定した。

(1) 加速度波形の比較

図-4.10～図-4.12は、3つの地震について、それぞれ各観測点の加速度波形の観測値と計算値の比較を行ったものである。ここでは、主要動部分の波形を減衰定数4ケースそれぞれについてその一致度及び特徴を示すと以下ようになる。

1) 房総半島南東沖地震

波形の周期及び振幅の一致度は、塔中間部及び桁についてはよいが、塔頂部はあまりよく合わない。

2) 福島県東方沖地震

波形の周期及び振幅の一致度は、1)と同様であるが、塔頂部の橋軸直角方向が特によく合わない。

3) 千葉県東方沖地震

全観測点とも波形の周期及び振幅の一致度がよい。ただし、塔の橋軸直角方向については、観測値と計算値の波形にずれが生じている。図-3.8に示した観測波形のフーリエスペクトルからは、この卓越振動数は、0.72 Hzと得られているが、計算では図-4.3に示したように0.74 Hzとなり、この0.02 Hzの違いが波形のずれとして現れている。

このため、塔の剛性のみを変化させて固有振動数を0.72 Hzとしたモデルを用いて、同様に応答計算を行った結果が図-4.13である。塔の加速度波形の周期特性が向上した。

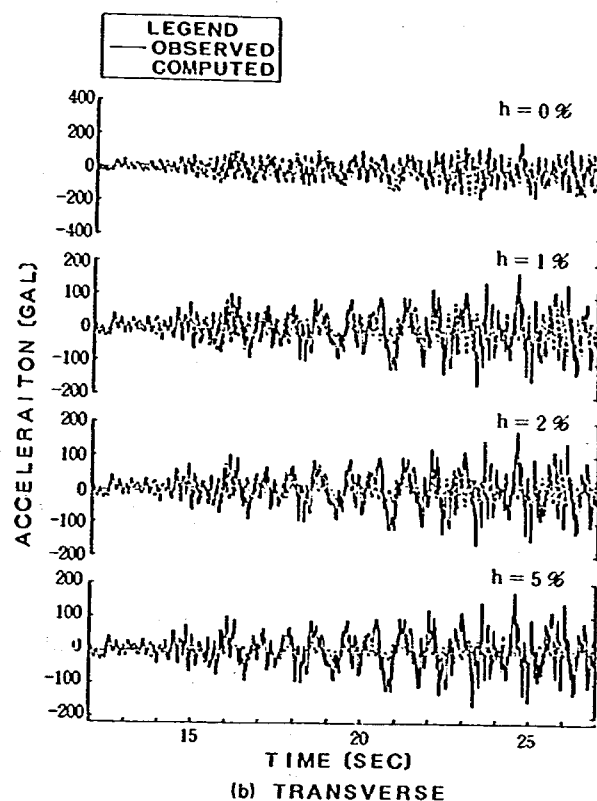
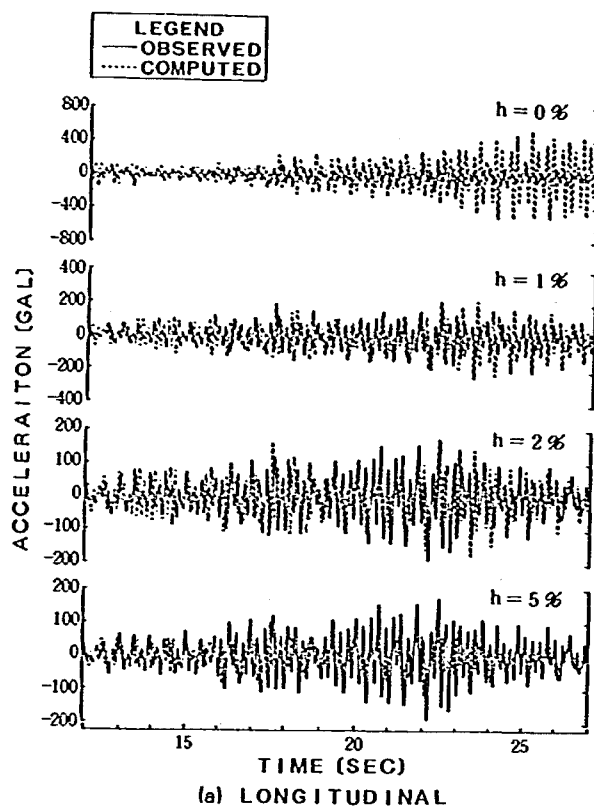


図-4.10 (1) 観測値と解析値の比較 (1986年6月24日房総半島南東沖地震, 塔頂部(A1))

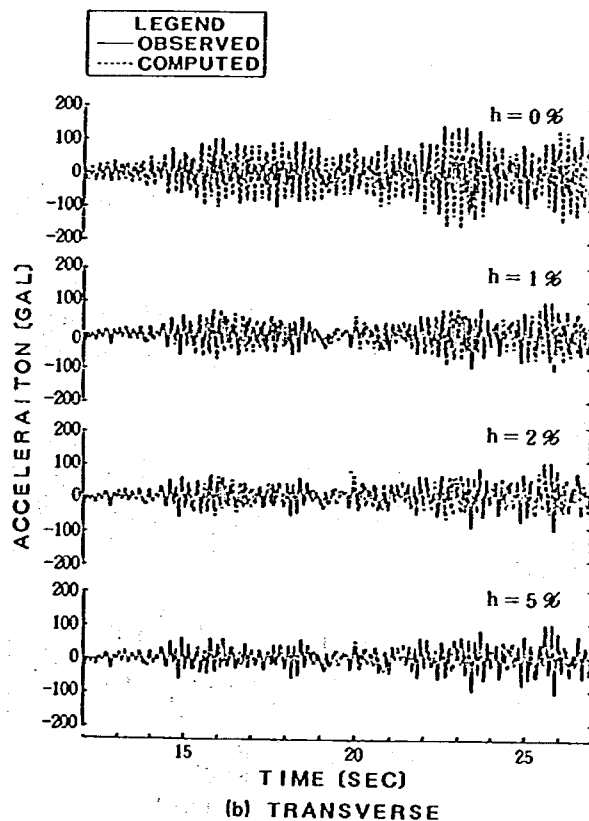
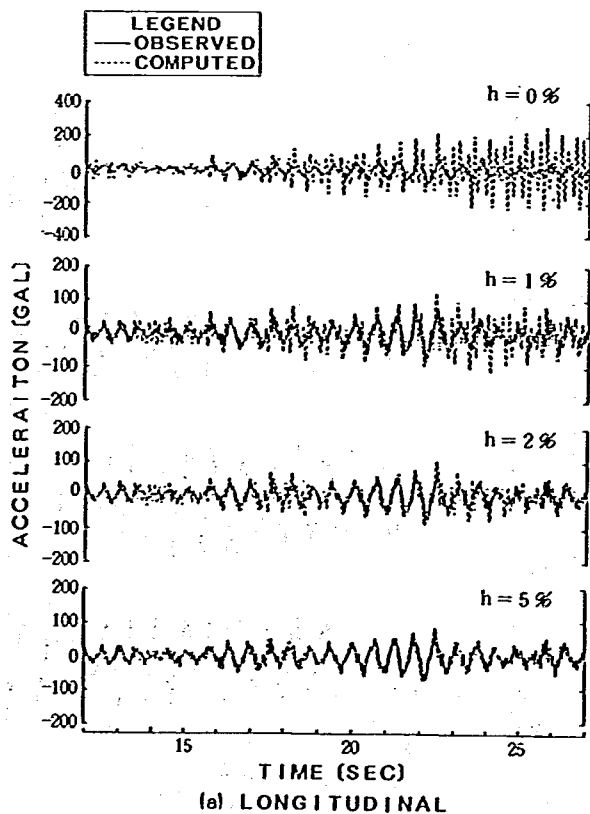
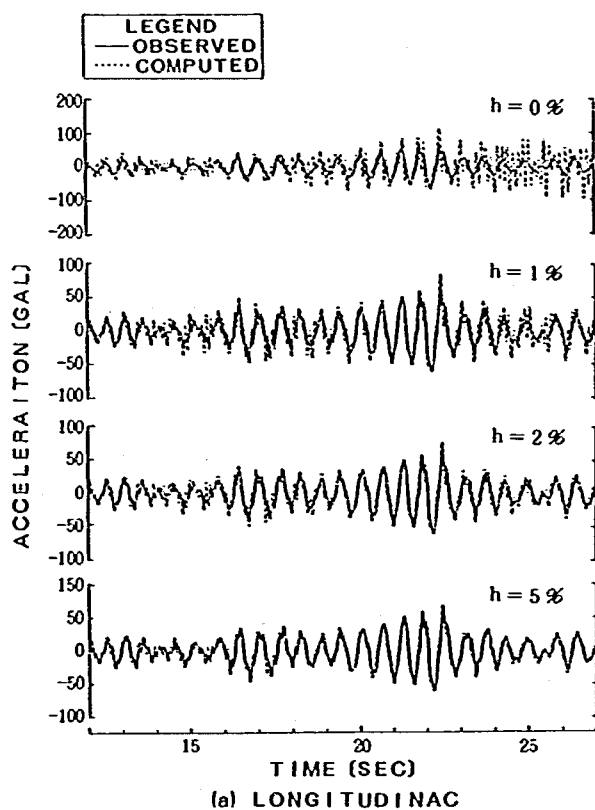
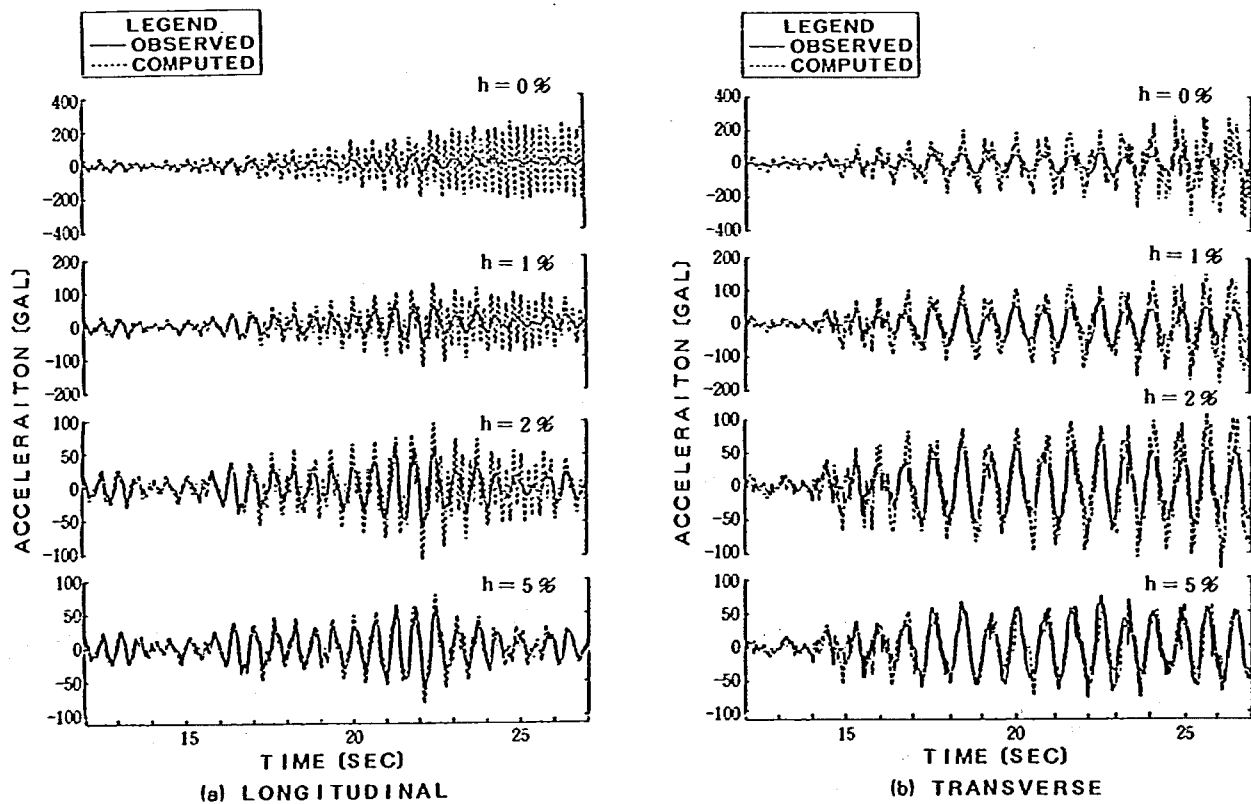


図-4.10 (2) 観測値と解析値の比較 (1986年6月24日房総半島南東沖地震, 塔中間部(A2))



図一 4.10 (3) 観測値と解析値の比較 (1986年6月24日房総半島南東沖地震, 茨城県側桁中央部(A4))



図一 4.10 (4) 観測値と解析値の比較 (1986年6月24日房総半島南東沖地震, 千葉県側桁中央部(A5))

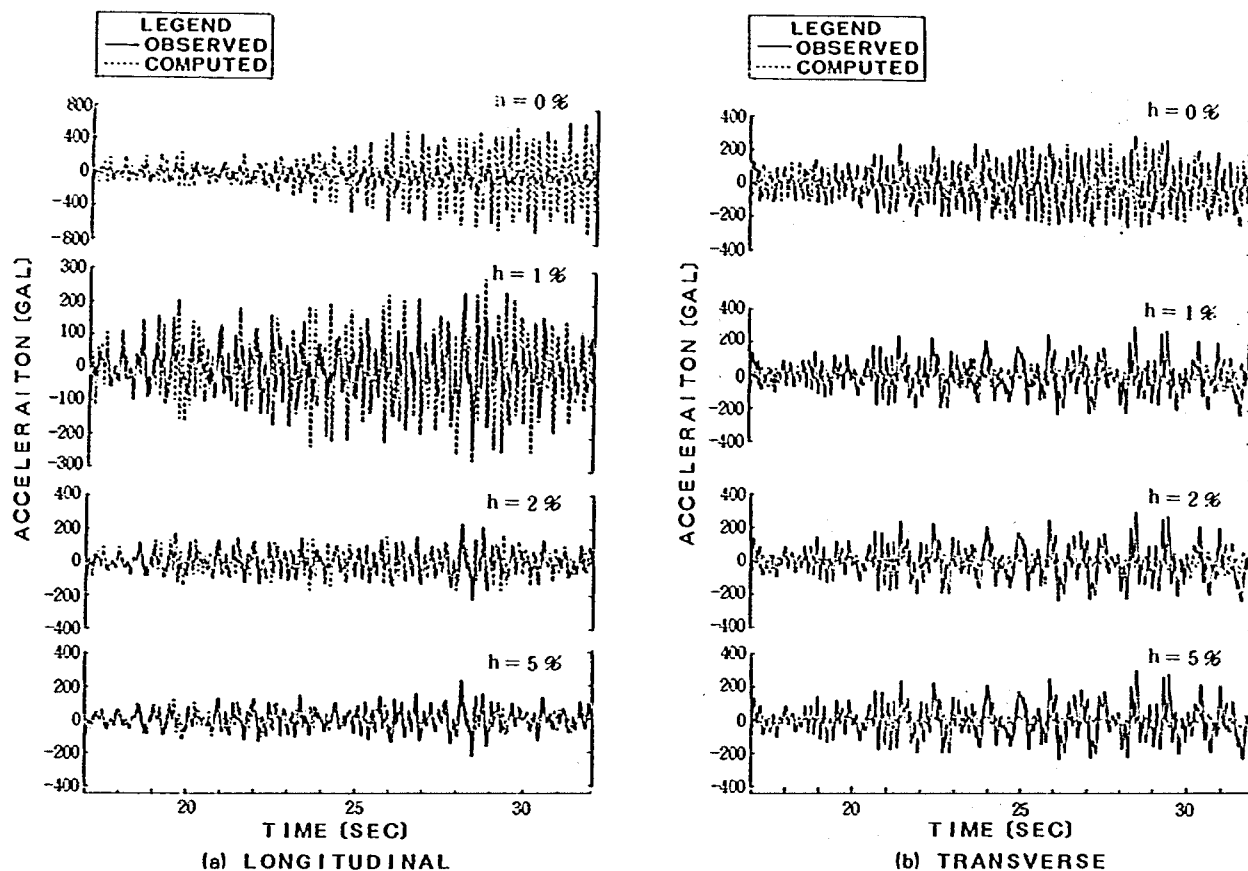


図-4.11 (1) 観測値と解析値の比較 (1987年2月6日福島県東方沖地震, 塔頂部(A1))

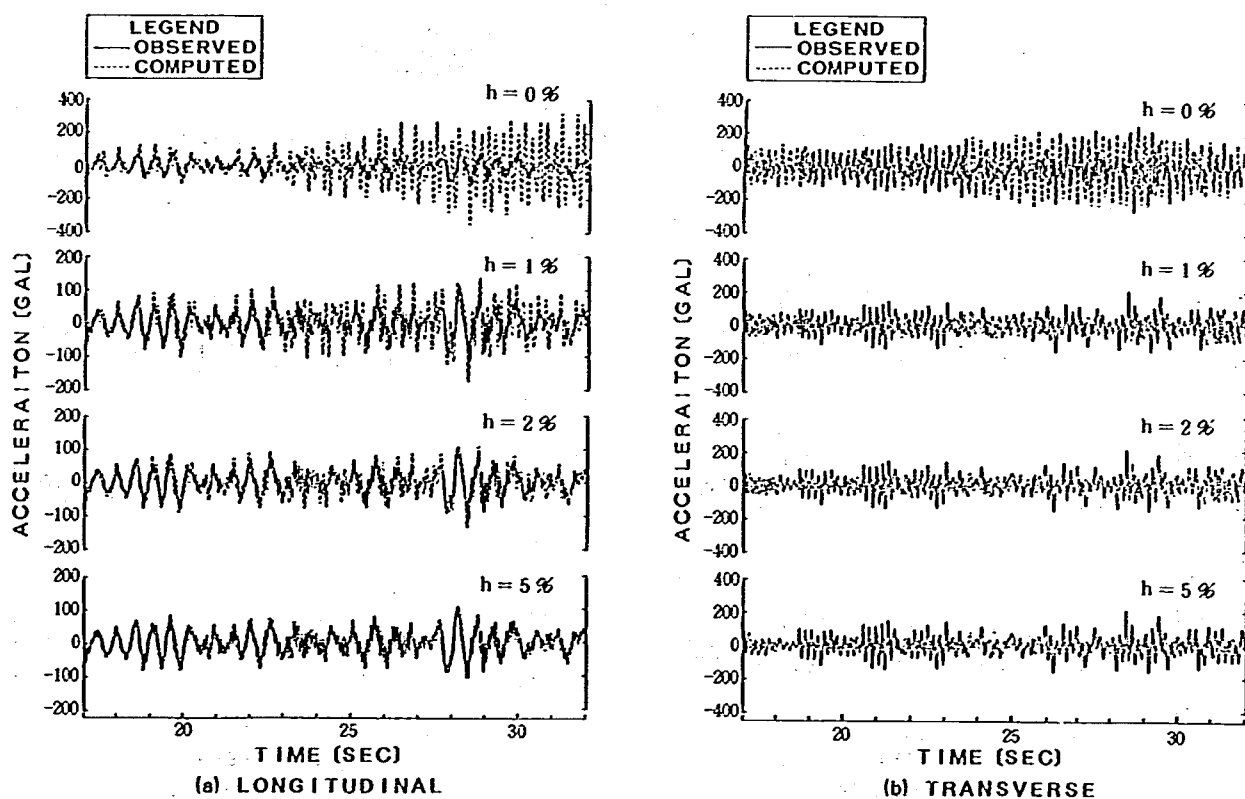
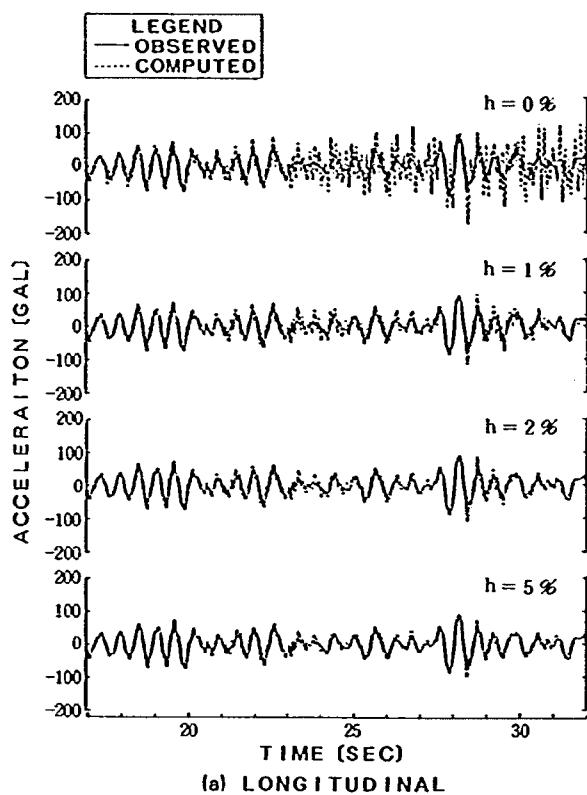
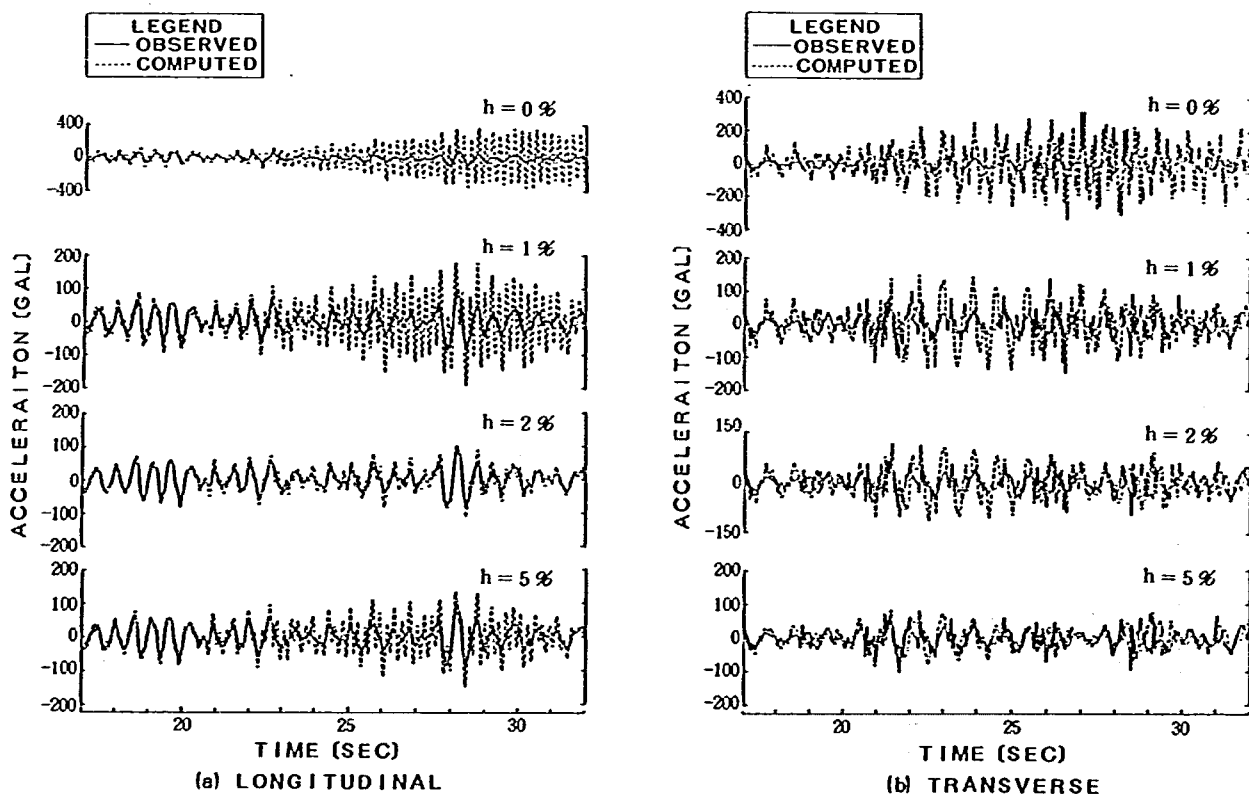


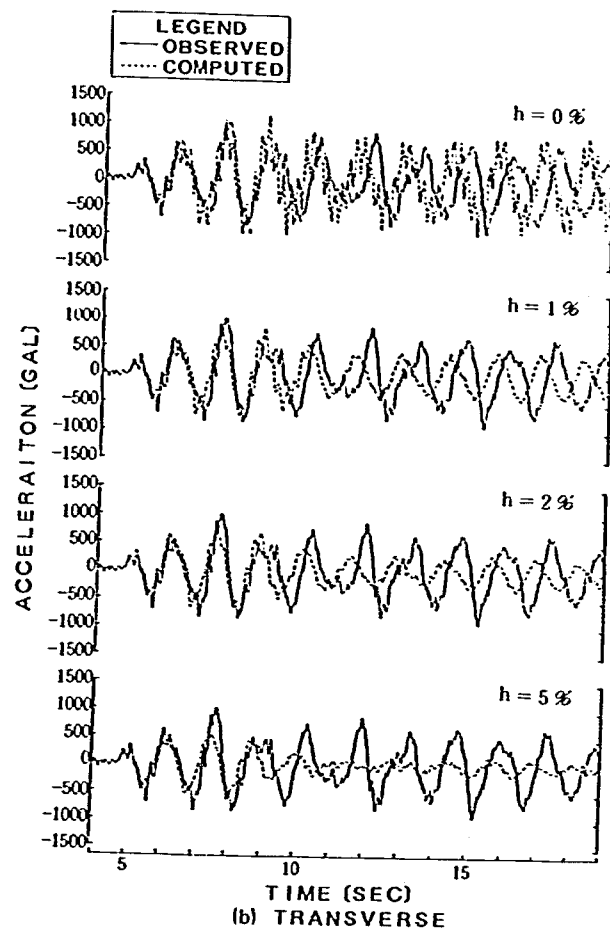
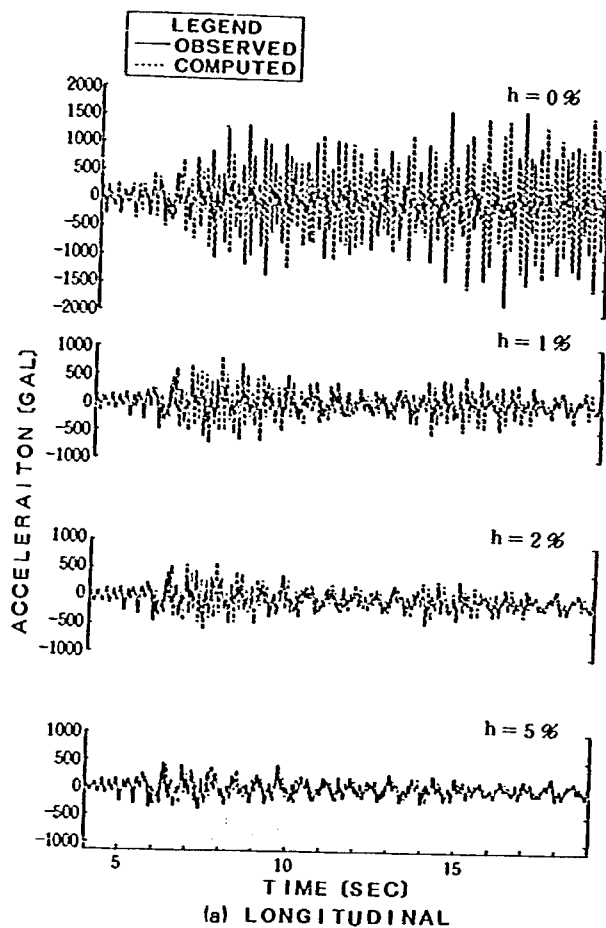
図-4.11 (2) 観測値と解析値の比較 (1987年2月6日福島県東方沖地震, 塔中間部(A2))



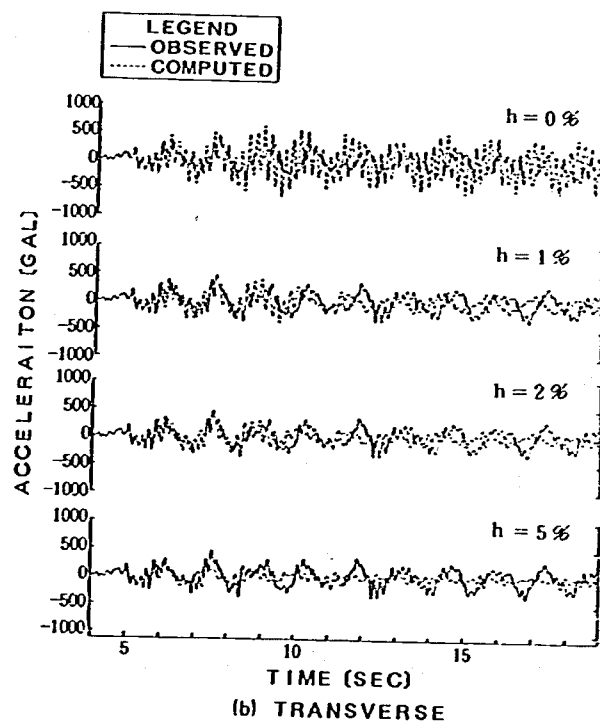
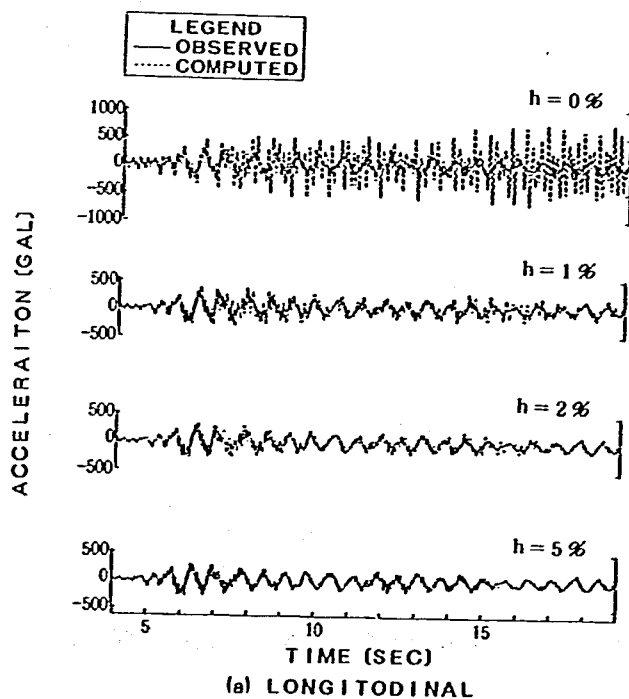
図一 4.11 (3) 観測値と解析値の比較 (1987年 2 月 6 日福島県東方沖地震, 茨城県側桁中央部 (A4))



図一 4.11 (4) 観測値と解析値の比較 (1987年 2 月 6 日福島県東方沖地震, 千葉県側桁中央部 (A5))



図一 4.12 (1) 観測値と解析値の比較 (1987年12月17日千葉県東方沖地震, 塔頂部(A1))



図一 4.12 (2) 観測値と解析値の比較 (1987年12月17日千葉県東方沖地震, 塔中間部(A2))

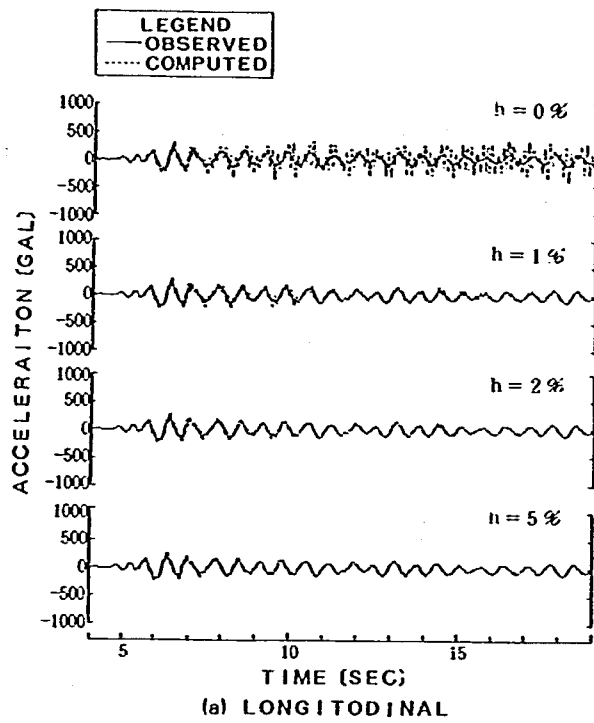


図-4.12 (3) 観測値と解析値の比較 (1987年12月17日千葉県東方沖地震, 茨城県側桁中央部(A4))

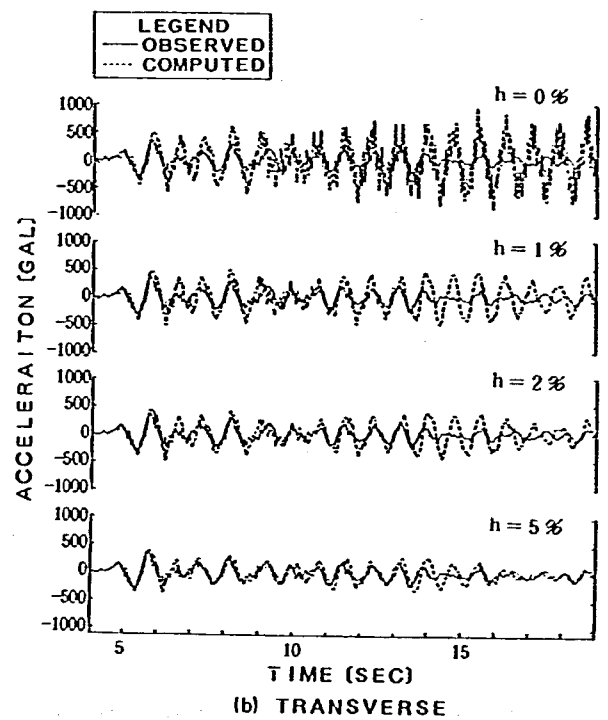
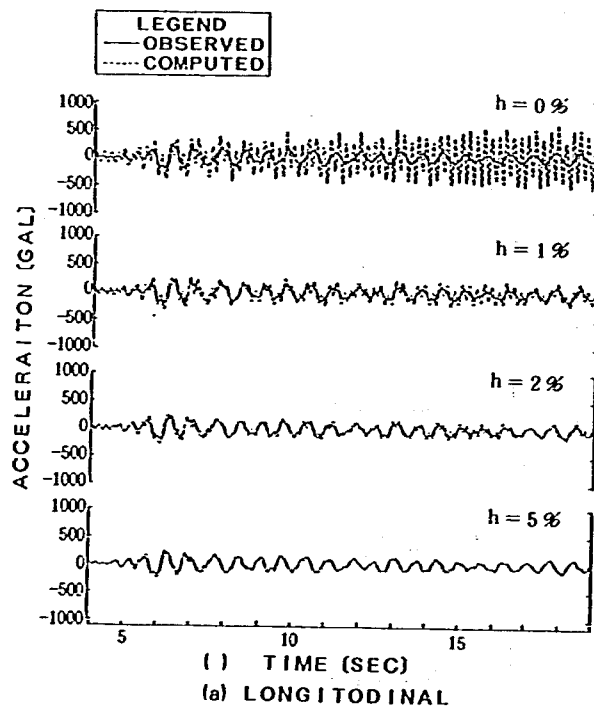


図-4.12 (4) 観測値と解析値の比較 (1987年12月17日千葉県東方沖地震, 千葉県側桁中央部(A5))

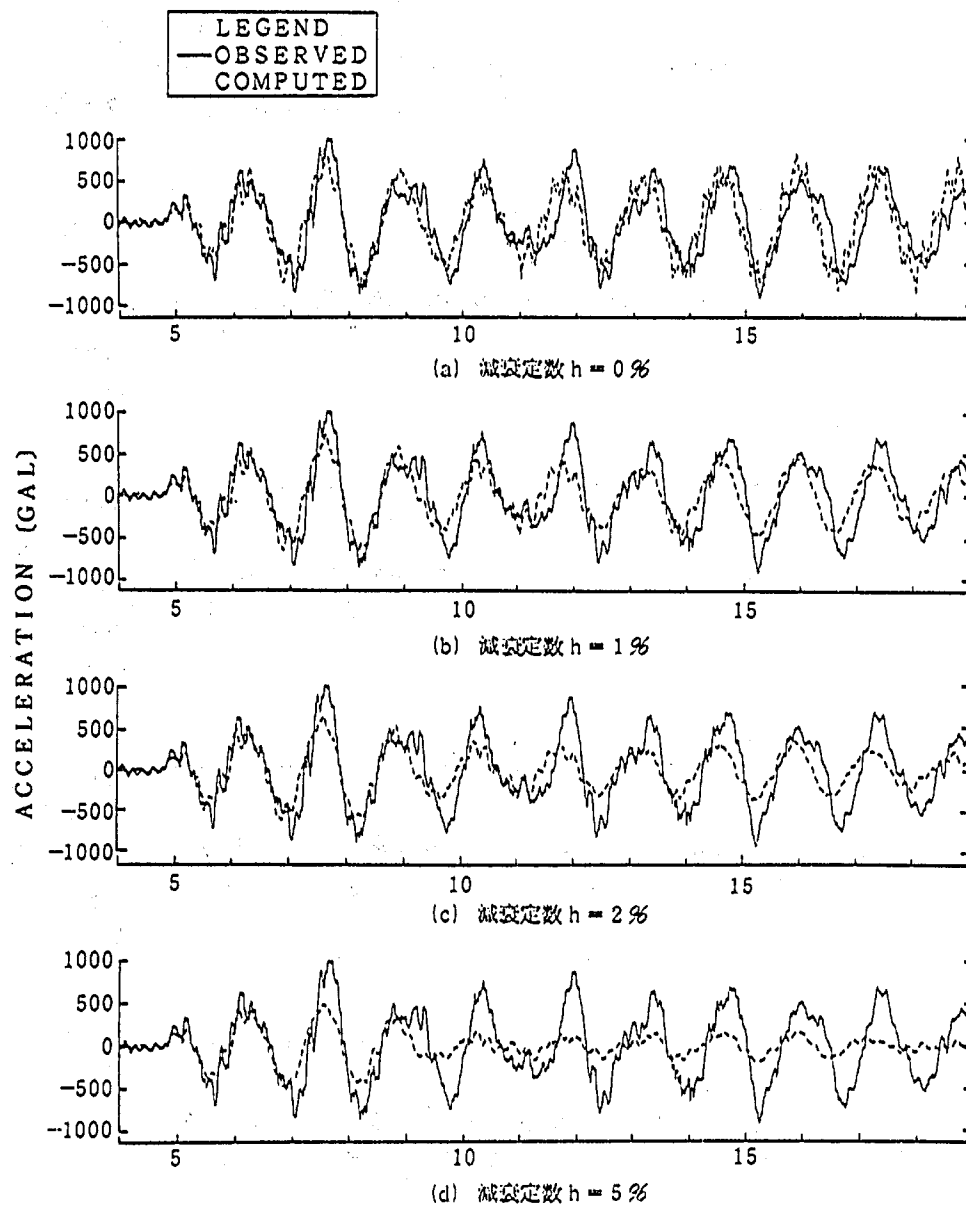


図-4.13 (1) 塔の振動が卓越する固有振動数を観測波形の振動数に修正したモデルによる計算値と観測値の比較 (千葉県東方沖地震, 塔頂部(A1), 橋軸直角方向)

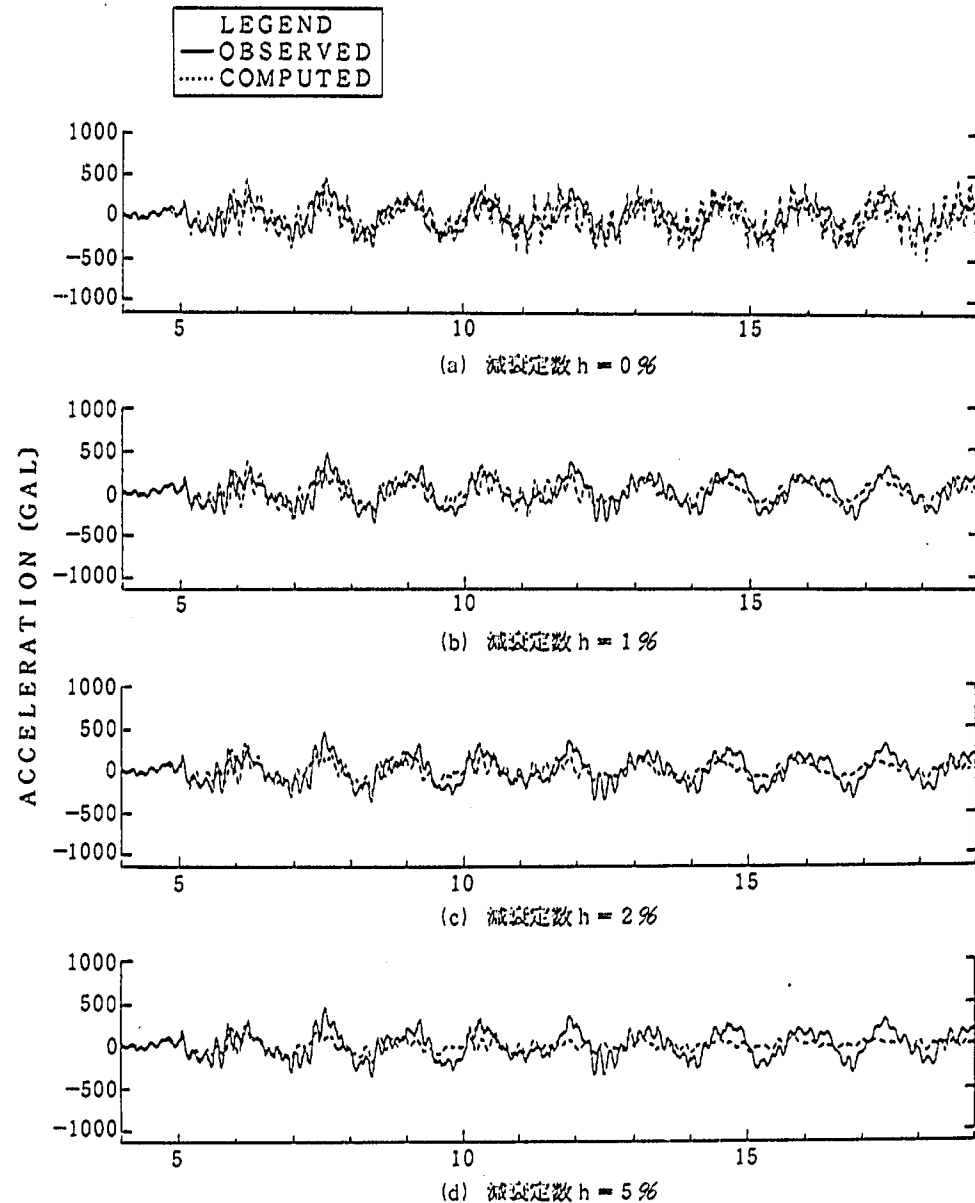


図-4.13 (2) 塔の振動が卓越する固有振動数を観測波形の振動数に修正したモデルによる計算値と観測値の比較 (千葉県東方沖地震, 塔中部(A2), 橋軸直角方向)

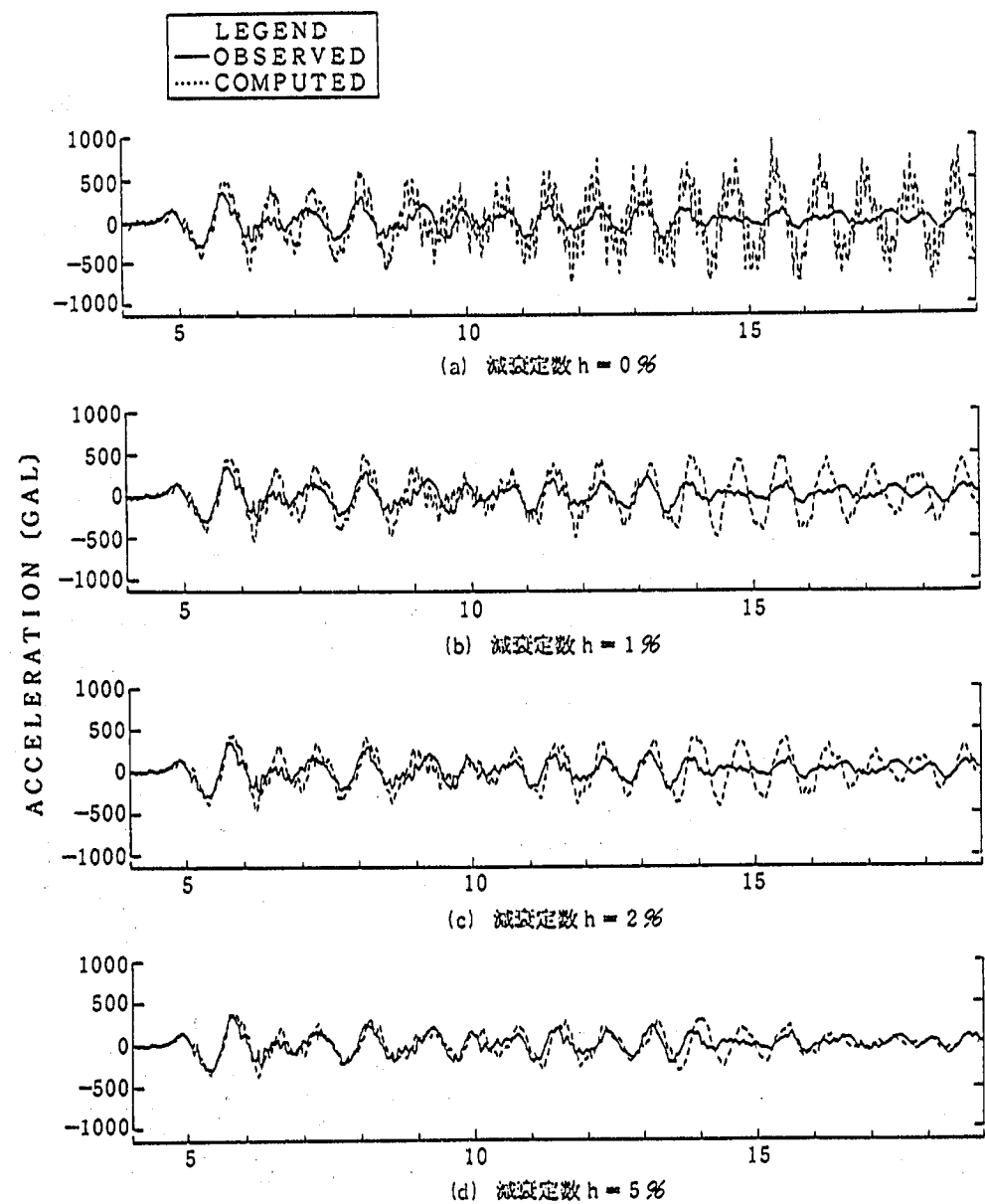


図-4.13 (3) 塔の振動が卓越する固有振動数を観測波形の振動数に修正したモデルによる計算値と観測値の比較 (千葉県東方沖地震, 桁中間部(A5), 橋軸直角方向)

(2) 水郷大橋上部工の減衰定数の推定

水郷大橋上部工の減衰定数の推定を目的として観測波形及び計算波形の最大加速度値の比較を行ったのが、表-4.7～表-4.9及び図-4.14～図-4.17である。これによれば以下の点が指摘される。

1) 橋軸方向

① 塔頂部

千葉県東方沖地震については2～5%の範囲で5%に近いが、他の2地震については1～2%の範囲内で2%に近い。

② 塔中間部

千葉県東方沖地震については、2～5%の範囲で5%に近いが、他の2地震については3%かそれよりもわずかに大きい。

③ 桁

千葉県東方沖地震については、ほぼ5%であり、他の2地震については3%よりもわずかに大きい。

2) 橋軸直角方向

① 塔頂部

房総半島南東沖地震については0%よりも小さいという結果といったが、他の2地震では0～1%の範囲である。

② 塔中間部

3地震とも0～1%の範囲で1%に近い。

③ 桁

千葉県東方沖地震については、5%よりもわずかに大きく、他の2地震は2～5%の範囲でほぼ5%である。

以上の結果をまとめると表-4.10のようになる。

水郷大橋上部工の減衰定数は、塔については、橋軸方向に2%、橋軸直角方向に0～1%、桁は両方向共に5%程度である。

また、一般に振幅が大きくなると減衰定数が大きくなるとされているが表-4.4によればこの傾向と異なる場合もあり本解析結果からは一概にいけない。

また、減衰が生じる原因として材料の内部減衰によるものと仮定すれば、塔の減衰定数が橋軸方向と橋軸直角方向と大きく異なるのは、斜材の存在によるものであると考えられる。

なお、水郷大橋の実橋振動実験（起振機振動実験、自由減衰試験）で得られた減衰定数は、鉛直たわみ振動の平均値が0.98%、ねじれ振動の平均値が1.2%であり、本解析結果と異なる。これについては、今後さらに検討が必要である。

表-4.7 昭和61年6月24日房総半島沖地震による観測波形と計算波形の最大応答値の比較

観 番 測 点 号	橋 軸 方 向 成 分					橋 軸 直 角 方 向 成 分				
	観測値 (gal)	計 算 値 (gal)				観測値 (gal)	計 算 値 (gal)			
		h=0	h=0.01	h=0.02	h=0.05		h = 0	h=0.01	h=0.02	h=0.05
A-1	189 (22.16)	734 (6253)	239 (2346)	178 (2246)	127 (2246)	217 (2789)	185 (28.50)	86 (15.95)	75 (15.95)	55 (15.95)
A-2	76 (22.49)	326 (43.21)	127 (22.45)	106 (22.45)	84 (22.45)	109 (25.88)	171 (28.29)	88 (22.69)	72 (22.69)	50 (20.02)
A-3	55 (22.16)	55 (22.16)				34 (14.81)	34 (14.81)			
A-4	61 (22.16)	130 (77.48)	86 (22.45)	79 (22.45)	69 (22.46)	(ピックアップの故障のため観測値が得られなかった)				
A-5	62 (21.29)	268 (45.62)	131 (22.12)	107 (22.13)	84 (22.13)	77 (22.14)	398 (27.20)	173 (26.10)	125 (26.10)	74 (20.54)

注) () 内の数値は、最大加速度の生じる時刻 (秒) を表わす。

表-4.8 昭和62年2月6日福島県東方沖地震による観測波形と計算波形の最大応答値の比較

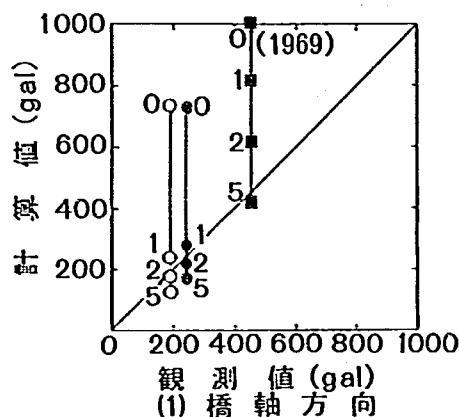
観 番 測 点 号	橋 軸 方 向 成 分					橋 軸 直 角 方 向 成 分				
	観測値 (gal)	計 算 値 (gal)				観測値 (gal)	計 算 値 (gal)			
		h = 0	h=0.01	h=0.02	h=0.05		h = 0	h=0.01	h=0.02	h=0.05
A-1	238 (28.16)	731 (32.79)	279 (28.76)	218 (28.76)	173 (28.46)	306 (28.51)	590 (65.58)	238 (34.66)	196 (34.66)	142 (34.66)
A-2	108 (28.16)	350 (28.43)	176 (28.43)	136 (28.43)	109 (28.42)	212 (28.44)	538 (70.54)	199 (35.28)	153 (34.57)	108 (34.57)
A-3	87 (28.20)	87 (28.20)				53 (23.11)	53 (23.11)			
A-4	92 (28.18)	177 (28.42)	117 (28.42)	108 (28.41)	102 (28.41)	(ピックアップの故障のため観測値が得られなかった)				
A-5	99 (28.17)	404 (52.80)	193 (28.42)	149 (28.42)	114 (28.42)	103 (21.66)	521 (72.24)	211 (71.76)	160 (71.29)	98 (71.29)

注) () 内の数値は、最大加速度の生じる時刻 (秒) を表わす。

表-4.9 昭和62年12月17日千葉県東方沖地震による観測波形の最大応答値の比較

観 番 測 値 号	橋 軸 方 向 成 分					橋 軸 直 角 方 向 成 分				
	観測値 (gal)	計 算 値 (gal)				観測値 (gal)	計 算 値 (gal)			
		h = 0	h=0.01	h=0.02	h=0.05		h = 0	h=0.01	h=0.02	h=0.05
A-1	449 (6.33)	1969 (40.03)	819 (7.79)	620 (7.79)	425 (6.89)	1008 (7.63)	1319 (33.14)	830 (7.53)	718 (7.53)	549 (6.77)
A-2	294 (6.33)	830 (38.39)	371 (6.42)	332 (6.42)	273 (6.41)	464 (7.57)	910 (72.75)	393 (8.93)	338 (6.14)	249 (5.91)
A-3	217 (6.38)	217 (6.38)				173 (5.17)	173 (5.17)			
A-4	257 (6.57)	422 (18.15)	297 (6.40)	280 (6.40)	259 (6.39)	(ピックアップ故障のため観測値が得られなかった)				
A-5	247 (6.31)	689 (21.47)	314 (6.09)	285 (6.09)	246 (6.08)	364 (5.73)	1143 (45.13)	524 (6.19)	486 (6.19)	382 (5.80)

注) () 内の数値は、最大加速度の生じる時刻 (秒) を表わす。



凡	例
○—○	S. 61.6.24 房総半島関東沖
●—●	S. 62.2.6 福島県東方沖
■—■	S. 62.12.17 千葉県東方沖

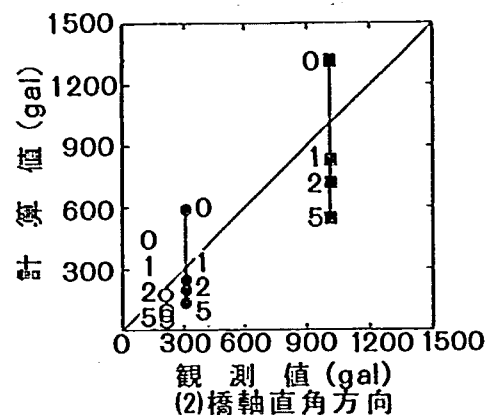
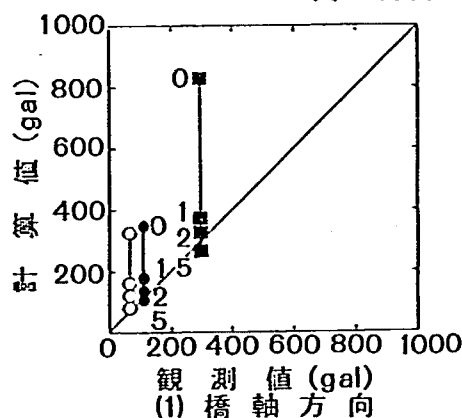


図-4.14 観測値と計算値の最大加速度の比較 (a) 塔頂部 (A 1)



凡	例
○—○	S. 61.6.24 房総半島関東沖
●—●	S. 62.2.6 福島県東方沖
■—■	S. 62.12.17 千葉県東方沖

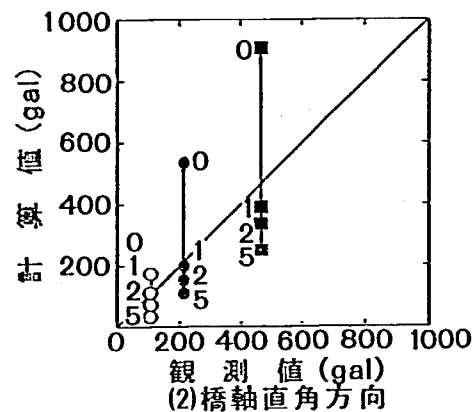
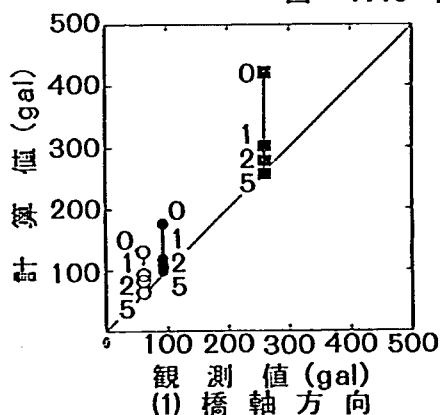
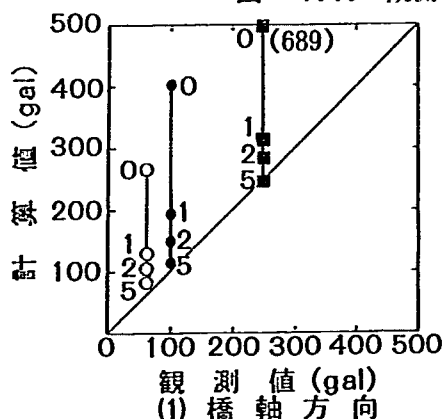


図-4.15 観測値と計算値の最大加速度の比較 (b) 塔中間部 (A 2)



凡	例
○—○	S. 61.6.24 房総半島関東沖
●—●	S. 62.2.6 福島県東方沖
■—■	S. 62.12.17 千葉県東方沖

図-4.16 観測値と計算値の最大加速度の比較 (c) 茨城県側中間部 (A 4)



凡	例
○—○	S. 61.6.24 房総半島関東沖
●—●	S. 62.2.6 福島県東方沖
■—■	S. 62.12.17 千葉県東方沖

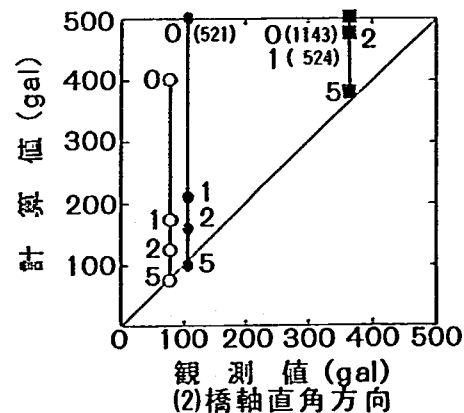


図-4.17 観測値と計算値の最大加速度の比較 (d) 千葉県側塔中間部 (A 5)

表-4.10 水郷大橋上部工の減衰定数の推定値

観測点 解析地震	橋 軸 方 向				橋 軸 直 角 方 向		
	A-1	A-2	A-4	A-5	A-1	A-2	A-5
房総半島南東沖地震	2%	5%	5%	5%	0%	1%	5%
福島県東方沖地震	2%	5%	5%	5%	0~1%	1%	5%
千葉県東方沖地震	5%	5%	5%	5%	0~1%	1%	5%

5. 結 論

水郷大橋で観測された地震記録の解析を行うとともに、水郷大橋上部工の減衰定数の推定を目的としたシミュレーション解析を行った。

以上の結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 3つの地震により得られた観測波形と計算波形は、その周期特性と振幅特性により一致がみられた。
- (2) 水郷大橋上部工の減衰定数は、塔は、橋軸方向に対して2%程度、橋軸直角方向に対して0～1%程度、桁は両方向に対して5%程度である。

この結果は、通常の橋梁の耐震設計での動的解析で上部工に対して仮定される減衰定数と近い結果を与えている。

- (3) 塔の減衰定数が橋軸方向と橋軸直角方向で異なる。この理由についてははっきりしないが、斜材の影響と考えられる。
- (4) 水郷大橋上部工の実橋振動実験（起振機振動実験、自由減衰試験）で得られた減衰定数は鉛直たわみ振動の平均値が0.98%、ねじれ振動の平均値が1.2%であり、本解析結果と異なる。これについて、今後さらに検討が必要である。

謝 辞

水郷大橋の強震計の設置に際しては、建設省関東地方建設局千葉国道工事事務所の御関係の皆様大変お世話になりました。特に以下の方々には現地踏査を含め、大変お世話になりました。ここに示して厚くお礼申し上げます。(敬称略、肩書は設置当時)

建設省関東地方建設局千葉国道工事事務所

調査課長 吉野 尚 治

〃 中 島 祥 介

管理第二課長 渡 辺 楠 男

〃 木 村 和 郎

建設監督官 飯 田 永佐訓

維持係長 横 内 治 久

〃 丸 山 要

計画係長 清 水 喜代志

建設技官 大 塩 俊 雄

建設技官 窪 田 達 也

同工事事務所酒々井出張所

所 長 福 田 正 夫

〃 石 田 莊八郎

管理係長 溝 井 康 友

〃 其 田 誠

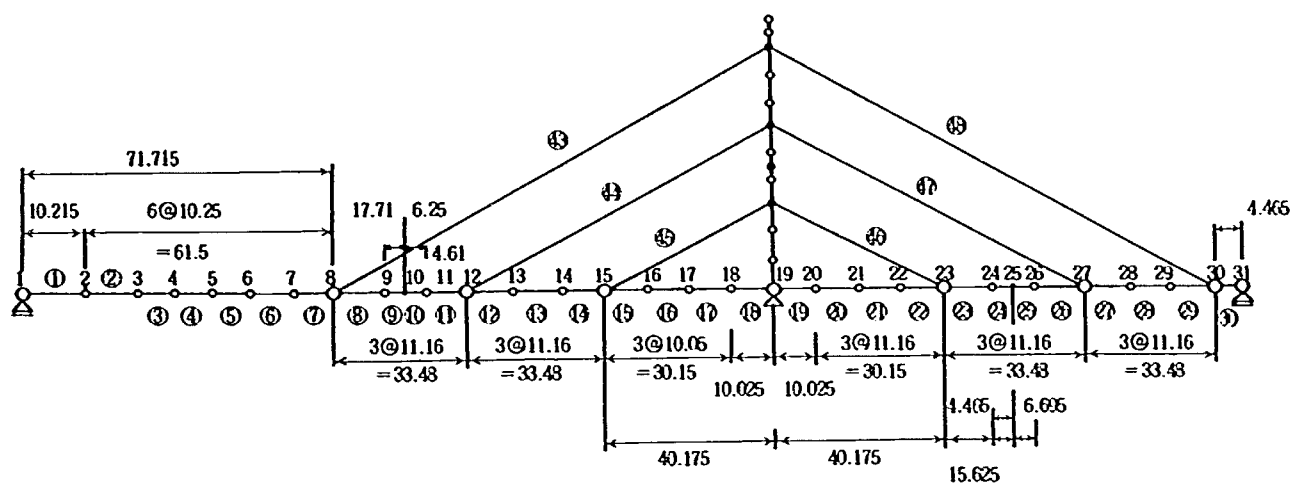
また、本強震計のデジタル集録装置本体は、土木研究所構造研究室所有の水郷大橋風観測小屋に設置させていただいた。機器の設置に際して、構造研究室の皆様大変お世話になりました。ここに厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

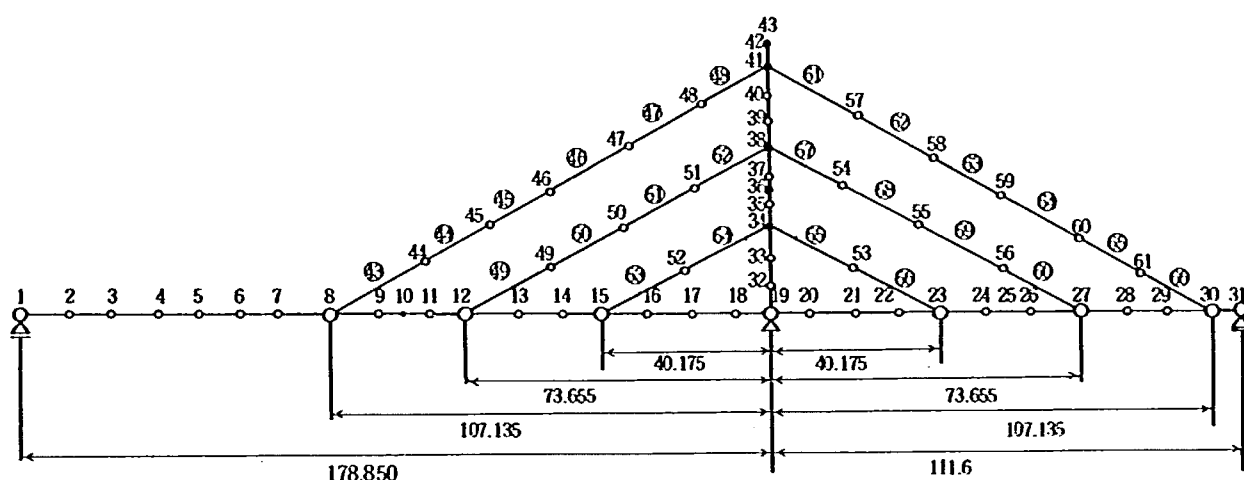
- 1) 川島一彦, 運上茂樹, 吾田洋一: 水郷大橋動的特性調査—強震観測システム—, 土木研究所資料第2380号, 昭和61年5月
- 2) 川島一彦, 運上茂樹, 吾田洋一: 斜張橋の耐震性に関する研究, — (その1) 振動実験から見た斜張橋の振動特性—, 土木研究所資料第2388号, 昭和61年6月
- 3) 川島一彦, 運上茂樹, 吾田洋一: 斜張橋の耐振性に関する研究, — (その2) 地震応答に及ぼす減衰定数の影響—, 土木研究所資料第2489号, 昭和62年3月
- 4) 川島一彦, 運上茂樹, 吾田洋一: 強震記録に基づく斜張橋の振動特性, 第19回地震工学研究発表会, pp. 429-432, 昭和62年7月
- 5) 川島一彦, 運上茂樹, 吾田洋一: 昭和62年千葉県東方沖地震による斜張橋の振動特性, 土木学会第43回年次学術講演会, 昭和63年10月
- 6) 岩崎敏男, 川島一彦, 高木義和: 道路橋井筒ケーソン橋脚の地震応答に及ぼす同区地盤の影響の解析, 土木研究所報告第154号, 昭和55年3月
- 7) 岩崎敏男, 川島一彦, 高木義和, 相沢 興: 開北橋における地盤とケーソン橋脚の動的相互作用の解析, 土木学会論文報告集第322号, pp. 15-24, 1982年6月
- 8) Wilson, J.C. : Analysis of the Observed Seismic Response of a Highway Bridge, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 14, pp. 339-354, 1986
- 9) 涌水 博, 太田勇和, 小山 忍: 水郷大橋上部工の設計と施工 (上), (下) 橋梁と基礎, Vol. 78, No. 3, Vol. 78, No. 4, 1978年3月, 4月
- 10) 成田信之: 水郷大橋振動実験報告書, 土木研究所資料第1349号, 昭和53年3月

付 属 資 料

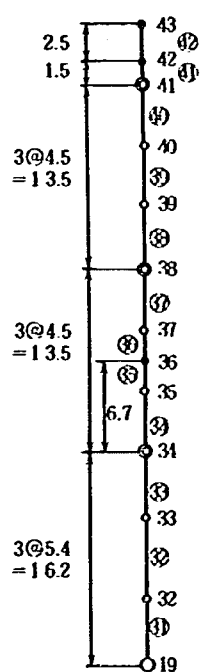
— 解 析 モ デ ル 諸 元 —



(a) ケーブルの質量を無視した場合



(b) ケーブルの質量を考慮した場合



(c) 塔詳細図

部材	節点 番号	x 座 標 (m)	y 座 標 (m)	並 進 質 量 (ton)	x 軸回り 回転質量 (t.m.sec ²)	部材	節点 番号	x 座 標 (m)	y 座 標 (m)	並 進 質 量 (ton)	x 軸回り 回転質量 (t.m.sec ²)
桁	1	0	0	75.213	280.064	桁	32	178.850	5.4	31.736	0
	2	10.215	↓	150.684	561.087		33	↓	10.8	↓	↓
	3	20.465	↓	150.942	562.046		34	↓	16.2	50.931 (44.440)	↓
	4	30.715	↓	↓	↓		35	↓	20.7	16.214	↓
	5	40.965	↓	↓	↓		36	↓	22.9	10.890	↓
	6	51.215	↓	↓	↓		37	↓	25.2	16.456	↓
	7	61.465	↓	↓	↓		38	↓	29.7	57.825 (37.657)	↓
	8	71.715	↓	213.502 (189.686)	586.996		39	↓	34.2	23.844	↓
	9	82.875	↓	130.399	611.945		40	↓	38.7	40.169	↓
	10	89.425	↓	82.171	0		41	↓	43.2	59.643 (12.012)	↓
	11	94.035	↓	116.115	611.945		42	↓	44.7	9.766	↓
	12	105.195	↓	197.967 (187.883)	↓		43	↓	47.2	6.104	↓
	13	116.355	↓	164.342	↓	ケーブルに質点を配置した場合	44	89.5708	7.2	9.5263	0
	14	127.515	↓	↓	↓		45	107.4267	14.4	↓	↓
	15	138.675	↓	180.233 (176.987)	581.512		46	125.2825	21.6	↓	↓
	16	148.725	↓	147.812	551.079		47	143.1383	28.8	↓	↓
	17	158.775	↓	↓	↓		48	160.9942	36.0	↓	↓
	18	168.825	↓	147.996	550.394		49	123.6088	7.425	6.7227	↓
	19	178.850	↓	165.400	563.553		50	142.0225	14.85	↓	↓
	20	188.875	↓	147.812	550.394		51	160.4363	22.275	↓	↓
	21	198.925	↓	147.996	551.079		52	158.7625	8.1	6.4912	↓
	22	208.975	↓	↓	↓		53	198.9375	↓	↓	↓
	23	219.025	↓	180.233 (176.987)	581.512		54	197.2638	22.275	6.7227	↓
	24	230.185	↓	115.047	611.945		55	215.6775	14.85	↓	↓
	25	234.650	↓	82.171	0		56	234.0913	7.425	↓	↓
	26	241.345	↓	131.466	611.945		57	196.7058	36.0	9.5263	↓
	27	252.505	↓	197.967 (187.883)	↓		58	214.5617	28.8	↓	↓
	28	263.665	↓	164.342	↓		59	232.4175	21.6	↓	↓
	29	274.825	↓	↓	↓		60	250.2733	14.4	↓	↓
	30	285.985	↓	115.047 (91.231)	428.389		61	268.1292	7.2	↓	↓
	31	290.450	↓	32.876	122.416						

注) () 内の数値は、ケーブルに質点を配置した場合の当該節点の質量を示す。

部材	部材 番号	I 端	J 端	断面積 A (m ²)	ねじり 剛性 I _x (m ⁴)	曲げ剛性 I _y (m ⁴)	曲げ剛性 I _z (m ⁴)	部材	部材 番号	I 物	J 物	断面積 A (m ²)	ねじり剛性 I _x (m ⁴)	曲げ剛性 I _y (m ⁴)	曲げ剛性 I _z (m ⁴)
桁	1	1	2	0.8455	2.2039	36.4956	1.197	塔	37	37	38	0.3884	0.5315	0.3815	0.4544
	2	2	3	↓	↓	↓	↓		38	38	39	0.3049	0.3900	0.2961	0.3504
	3	3	4	0.9053	2.4853	36.8668	1.444		39	39	40	↓	↓	↓	↓
	4	4	5	↓	↓	↓	↓		40	40	41	↓	↓	↓	↓
	5	5	6	0.9103	2.5041	36.9097	1.463		41	41	42	↓	↓	↓	↓
	6	6	7	↓	↓	↓	↓		42	42	43	↓	↓	↓	↓
	7	7	8	0.8598	2.2381	36.5379	1.255		43	8	41	0.06306	0.01547	0.007733	0.007733
	8	8	9	0.8743	2.1833	36.5217	1.306		44	12	38	0.04315	0.007178	0.003589	0.003589
	9	9	10	↓	↓	↓	↓		45	15	34	0.03820	0.005660	0.002830	0.002830
	10	10	11	↓	↓	↓	↓		46	23	34	↓	↓	↓	↓
	11	11	12	↓	↓	↓	↓		47	27	38	0.04315	0.007178	0.003589	0.003589
	12	12	13	↓	↓	↓	↓		48	30	41	0.06306	0.01547	0.007733	0.007733
	13	13	14	↓	↓	↓	↓	ケーブル (配置しない場合) ケーブル (ケーブルに質点を配置した場合)	43	8	44	0.06306	0.01547	0.007733	0.007733
	14	14	15	↓	↓	↓	↓		44	44	45	↓	↓	↓	↓
	15	15	16	↓	↓	↓	↓		45	45	46	↓	↓	↓	↓
	16	16	17	↓	↓	↓	↓		46	46	47	↓	↓	↓	↓
	17	17	18	0.9178	2.3785	36.7635	1.470		47	47	48	↓	↓	↓	↓
	18	18	19	↓	↓	↓	↓		48	48	41	↓	↓	↓	↓
	19	19	20	↓	↓	↓	↓		49	12	49	0.04315	0.007178	0.003589	0.003589
	20	20	21	↓	↓	↓	↓		50	49	50	↓	↓	↓	↓
	21	21	22	0.8743	2.1833	36.5217	1.306		51	50	51	↓	↓	↓	↓
	22	22	23	↓	↓	↓	↓		52	51	38	↓	↓	↓	↓
	23	23	24	↓	↓	↓	↓		53	15	52	0.03820	0.005660	0.002830	0.002830
	24	24	25	↓	↓	↓	↓		54	52	34	↓	↓	↓	↓
	25	25	26	0.8857	2.2451	36.5477	1.351		55	34	53	↓	↓	↓	↓
	26	26	27	↓	↓	↓	↓		56	53	23	↓	↓	↓	↓
	27	27	28	↓	↓	↓	↓		57	38	54	0.04315	0.007178	0.003589	0.003589
	28	28	29	↓	↓	↓	↓		58	54	55	↓	↓	↓	↓
	29	29	30	0.8743	2.1833	36.5217	1.306		59	55	56	↓	↓	↓	↓
	30	30	31	↓	↓	↓	↓		60	56	27	↓	↓	↓	↓
塔	31	19	32	0.4717	0.6727	0.4661	0.5593		61	41	57	0.06306	0.01547	0.007733	0.007733
	32	32	33	↓	↓	↓	↓		62	57	58	↓	↓	↓	↓
	33	33	34	↓	↓	↓	↓		63	58	59	↓	↓	↓	↓
	34	34	35	0.3884	0.5315	0.3815	0.4544		64	59	60	↓	↓	↓	↓
	35	35	36	↓	↓	↓	↓		65	60	61	↓	↓	↓	↓
	36	36	37	↓	↓	↓	↓		66	61	30	↓	↓	↓	↓

注) ・塔及び桁 $E_s = 2.1 \times 10^7 \text{ t/m}^2$ ・ケーブル $E_c = 2.0 \times 10^7 \text{ t/m}^2$
 $G_s = 8.1 \times 10^6 \text{ t/m}^2$

斜張橋の耐震性に関する研究

— (その6) 水郷大橋の動的特性調査—

土木研究所資料

第2673号昭和63年6月

川島 一彦, 運上 茂樹, 吾田 洋一

要 旨

近年、大規模特殊事業関連の道路において長大スパンの斜張橋が採用される事例が急増している。これは、斜張橋が従来の吊橋と連続桁橋の中間の特性を有し、吊橋のように巨大なアンカー基礎を必要とせず、軟質な地盤上に建設される長大橋として構造的に適しているとともに橋梁技術の進歩に伴い、長大スパン化が可能となったためである。しかしながら、斜張橋に対しては、従来震害経験がなく、また、強震観測等による動的特性の把握も十分でないのが実情である。

斜張橋の地震応答特性の調査及び斜張橋の動的特性を取り入れた耐震設計法の開発を目的として、一般国道51号が、1級河川利根川を渡る千葉・茨城両県境に架設されている建設省関東地方建設局管内の水郷大橋に強震観測システムを設置し、昭和61年3月から観測を開始した。現在までに加速度レベルの低い記録も含めて30数派の記録が得られた。

本報告は、これらの記録を解析するとともに、水郷大橋の減衰特性に関して検討した結果をとりまとめたものである。

キーワード：斜張橋、水郷大橋、強震記録、減衰特性

郵便はがき

3 0 5 - □ □

41円切手
をはって
下さい

建設省土木研究所
耐震研究室 御中

茨城県つくば市大字旭一番地

No 055

No 055

配布先氏名

配布先住所

○

土木研究所資料第2673号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住 所)

氏 名

印

○