

土木研究所資料

浮体橋の動揺量推定手法の開発

平成17年3月

独立行政法人 土木研究所
構造物研究グループ橋梁構造チーム

Copyright © (2005) 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 Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事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、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

浮体橋の動揺量推定手法の開発

構造物研究グループ
橋梁構造チーム

同
同
同
同
同

上席研究員 村越 潤
上席研究員 平原 伸幸 *
主任研究員 麓 興一郎
交流研究員 山森 誠史 **
交流研究員 林 雄一 ***
交流研究員 吉岡 勉

要 旨

浮体橋は、水の浮力を利用することで基礎構造を省略することが可能であり、コスト削減の観点から次世代の海上を横断する構造物として期待されている。しかしながら、国内においてはその実績が少なく確立した設計手法が無いのが現状である。また、波浪条件の厳しい我が国においては沿岸部における浮体橋の適用性の可否が課題となる。

このような背景の下、本研究は、浮体橋の設計において最も重要となる動揺量に着目し、その推定手法を開発するとともに、これを用いて我が国における浮体橋の適用可能性を確認することを目的とする。

キーワード：浮体橋、波浪、動揺、周波数応答解析、時刻歴応答解析

- * 現在：本州四国連絡橋公団保全部保全企画課
- ** 交流研究員在職期間（平成13年4月～平成14年6月）
現在：日本技術開発株式会社大阪支社構造橋梁部
- *** 交流研究員在職期間（平成14年7月～平成15年3月）
現在：日本技術開発株式会社東京支社構造橋梁部

目 次

1. 研究の概要	1
1. 1 背景と目的	1
1. 2 研究の内容	1
2. 浮体橋の種類と事例調査	3
2. 1 浮体橋の種類	3
2. 1. 1 浮体構造による分類	3
2. 1. 2 係留形式による分類	5
2. 2 浮体橋の事例	7
3. 動揺量推定手法の開発	10
3. 1 概要	10
3. 2 周波数応答解析	11
3. 2. 1 解析手法の概要	11
3. 2. 2 解析手法の検証	14
3. 3 時刻歴応答解析	30
3. 3. 1 解析手法の概要	30
3. 3. 2 運動方程式	32
3. 3. 3 モード法	32
3. 3. 4 NEWMARK- β 法	34
3. 3. 5 NEWMARK- β 法におけるメモリー影響の項の処理方法	35
3. 3. 6 メモリー影響関数のFFTによる計算法	37
3. 4 時刻歴応答解析手法の解析的検証	38
3. 4. 1 簡易モデルによる検証	38
3. 4. 2 浮体橋モデルによる検証	48
3. 5 時刻歴応答解析手法の実験的検証	72
3. 5. 1 実験方法	72
3. 5. 2 実験結果	76
3. 5. 3 実験値と解析値の比較	77
3. 6 動揺量推定プログラムの開発	78
3. 6. 1 システムの概要	78
3. 6. 2 周波数応答解析	81
3. 6. 3 時刻歴応答解析	82
4. 浮体橋の適用性の検討	87
4. 1 概要	87
4. 2 動揺に着目した適用性検討	87
4. 2. 1 検討方法	87
4. 2. 2 動揺量の照査に用いる評価指標と許容値	90
4. 2. 3 検討条件	90
4. 2. 4 一次選定（周波数応答解析による検討）	100
4. 2. 5 二次選定（時刻歴応答解析による検討）	111
4. 3 経済性に着目した検討	143
4. 3. 1 検討方法	143
4. 3. 2 経済比較検討	144
4. 4 まとめ	147
5. 今後の課題	148
(巻末資料)	
資料1：浮体橋の適用事例	153
資料2：適用性の検討に用いた波浪観測地点の有義波	159
資料3：観測波高による極値統計解析	182

1 研究の概要

1.1 背景と目的

海に囲まれ、多数の島嶼部を有するわが国では、海峡などにより隔てられた地域が多く存在している。多様な地域特性を活かし、国土の均等ある発展を実現していくためには、これらの地域の連携、交流を図る必要がある。そのためには、海上を横断し地域間を連結する手段（構造物）の整備が必要不可欠である。

浮体橋は、水の浮力を利用することで基礎構造を省略することが可能であり、コスト縮減の観点から次世代の海上を横断する構造物として期待されている。しかしながら、国内においてはその実績が少なく確立した設計手法が無いのが現状である。また、波浪条件の厳しい我が国においては沿岸部における浮体橋の適用性の可否が課題となる。

このような背景の下、本研究は、浮体橋の設計において最も重要となる動揺量に着目し、その推定手法を開発するとともに、これを用いて我が国における浮体橋の適用可能性を確認することを目的とする。

1.2 研究の内容

本研究では、浮体橋の動揺量推定手法を開発するにあたり学術的知識が必要不可欠であり、かつ実験的検証も伴うことから、京都大学、(株)建設技術研究所、日立造船(株)、新日本製鐵(株)の4者による研究グループへの委託研究を行った。表-1.1.1に土木研究所と委託研究の作業分担を示す。

表-1.1.1 作業分担

	土木研究所	委託研究
		〔 京都大学、(株)建設技術研究所 日立造船(株)、新日本製鐵(株) 〕
作業 分 担	・浮体橋の事例調査（2章） ・委託研究で開発した動揺量推定手法と汎用コード NASTRAN を統合させたシステムの構築（3.6） ・浮体橋の動揺量に着目した適用性検討および経済性に着目した検討（4章）	・動揺量推定手法（周波数応答解析、時刻歴応答解析）の開発（3章） ・開発した推定手法の解析的検証（3.4） ・開発した推定手法の実験的検証（3.5）

以下に、本資料の構成と内容を示す。

（1）浮体橋の種類と事例調査（2章）

浮体橋は、諸外国の比較的静穏な地域で実績のある構造である。今後、我が国において浮体橋を適用するにあたっては、浮体橋の種類とその特徴を把握しておく必要がある。そのため、ここでは、既に供用されている浮体橋の事例を調査すると共に、浮体橋の種類とその概要をまとめた。

(2) 動揺量推定手法の開発 (3 章)

浮体橋の設計では、波浪や風による動揺量を推定することが必要である。ここでは、京都大学等への委託研究により、浮体橋の動揺量（加速度、変位）を推定する手法を開発した。また、本手法と固有値解析に用いる汎用コード NASTRAN を統合するための GUI（Graphical User Interface）を構築し、実用化に向け動揺量推定計算のプログラム化を図った。推定手法は、周波数応答解析と時刻歴応答解析の 2 つの手法を基本とし開発した。また、浮体橋の模型実験を実施し、開発した動揺量推定手法の検証を行った。

(3) 浮体橋の適用可能性検討 (4 章)

開発した動揺推定プログラムを用いて、我が国における浮体橋の適用可能性について、車両の走行安定性に主眼を置いた動揺量に着目した検討、および従来橋梁との経済性に着目した検討を行った。

(4) 今後の課題 (5 章)

今後の実用化に向けての課題を整理した。

なお、本研究の成果については、下記論文等により公表している。

- ・ 平原伸幸，麓興一郎，山森誠史：浮体橋の適用可能性に関する調査，土木学会第 57 回年次学術講演会，I－647，2002.9
- ・ 渡邊英一，宇都宮智昭，岡藤孝史，村越潤，麓興一郎：浮体橋の波浪応答シミュレーションプログラムの開発，構造工学論文集，Vol.49A，pp.661-668，2003.9
- ・ 村越潤，麓興一郎，林雄一：浮体橋の適用可能性に関する検討，土木学会第 58 回年次学術講演会，I－680，2003.9
- ・ 村越潤，麓興一郎，永田修一，田中洋，渡邊英一，宇都宮智昭：風・波作用下にある浮体橋の弾性挙動に関する模型実験，日立造船技報，Vol.64，No.2，2003.11
- ・ 村越潤，麓興一郎，永田修一，新里英幸，白井秀治，渡邊英一，宇都宮智昭：波と風の複合外力下における浮体橋の挙動に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.50A，pp.613-622，2004.3

2 浮体橋の種類と事例

浮体橋は、諸外国の比較的静穏な地域で実績のある構造である。今後、我が国において浮体橋を適用するにあたっては、浮体橋の種類とその特徴を把握しておく必要がある。そのため、ここでは、構想や計画を含め既に供用されている浮体橋の事例を調査すると共に、浮体橋の種類とその概要をまとめた。

2.1 浮体橋の種類

2.1.1 浮体構造による分類

浮体橋は、浮体構造（ポンツーン）の形式から「連結構造」と「分離（単体）構造」の、大きく2つのタイプに分けることができる。前者は、浮体構造が、橋全体で連続している構造であり連続ポンツーン型と呼ばれている。後者は、浮体構造が数個に独立している構造であり、分離ポンツーン型と呼ばれている。また、分離ポンツーン型では、さらに4つのタイプに分けられ、浮体橋全体として、図-2.1.1に示す構造形式に分けられる。

図-2.1.1の構造のうち、今後適用の可能性が高いと考えられる連続ポンツーン型、分離ポンツーン型、およびセミサブ式ポンツーン型の特徴を表-2.1.2に示す。

表-2.1.1 浮体橋の各形式の特徴

	連続ポンツーン型	分離ポンツーン型	セミサブ式ポンツーン型
構造	箱形	箱形	半潜水形
特徴	・安定性が良い ・製作費が安い	・安定性が良い ・製作費が安い	・波の影響を小さくできる
適用例	浮体道路	浮体道路	石油掘削基地
採用に適した条件	静穏な湾内で大型船舶の航行がない海域	静穏な湾内で大型船舶の航行がある海域	水深が大きく波の高い海域

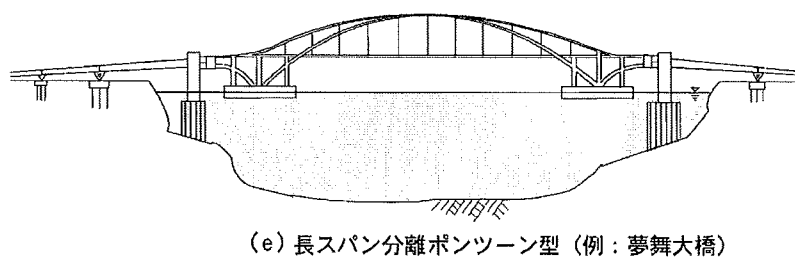
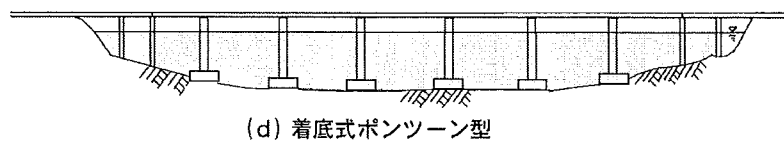
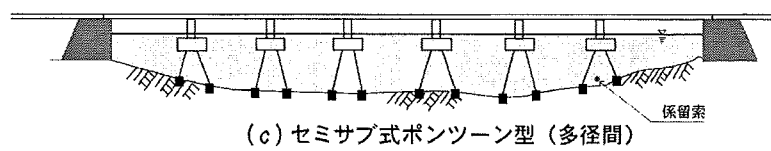
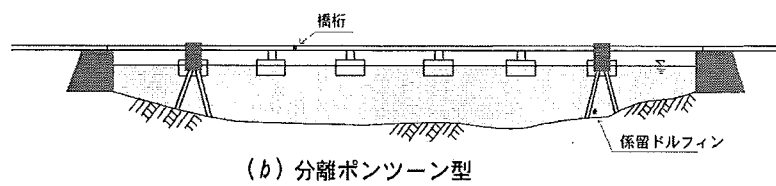
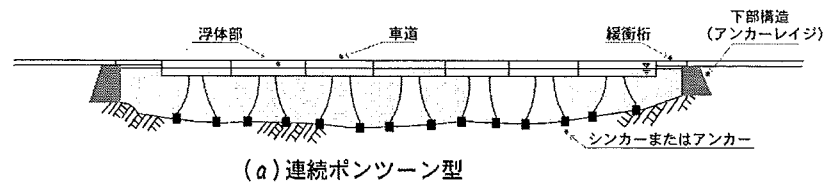


図-2.1.1 浮体橋の種類

2.1.2 係留形式による分類

ここでは、浮体橋での採用が予想される係留形式の種類とその特徴について整理した。係留の形態としては、カテナリー係留、ドルフィン係留、TLP 係留 (Tension Leg Platform)、両端固定係留などがある。これらの係留方法から、水深、波浪条件などの自然条件や、変位を制限する必要がある場合などの使用条件に応じて適切な方法を選定する必要がある。

以下に、各係留方法の概要を示す。また、表-2.1.2 に、各条件に対する係留方法の適応性を整理する。

表-2.1.2 係留形式の特徴

		カテナリー係留	ドルフィン係留	TLP 係留	両端固定係留
高波浪海域		高波に対応できない	高波に対応できる	高波に対応できる	高波に対応できない
水深	大水深	不適 (不経済)	不適 (不経済)	適する	適する
	中水深	適する	不適 (不経済)	やや適する	適する
	小水深	不適 (不経済)	適する	不適	適する
占有面積		占有面積が大きい	占有面積が小さい	占有面積が小さい	占有面積が小さい
変位制御		ある程度水深がないと変位制御ができない	変位制御ができる	変位制御ができる	変位制御ができない

(1) カテナリー係留

カテナリー係留は、チェーン係留のようにカテナリー形状の幾何学的変形に伴う復元力により係留する方法である。係留索の構成は、チェーン、ワイヤーロープ、合成繊維ロープ、複合索、中間ブイ、シンカーなどである。水深 10m 以深に適用される事例が多く、比較的水深が深い箇所では経済的となる。一方で、①水深が浅い海域では係留反力が得にくいため、水平移動が大きくなる傾向にあること、②係留構造の水域占有面積が大きくなること、などの課題がある。

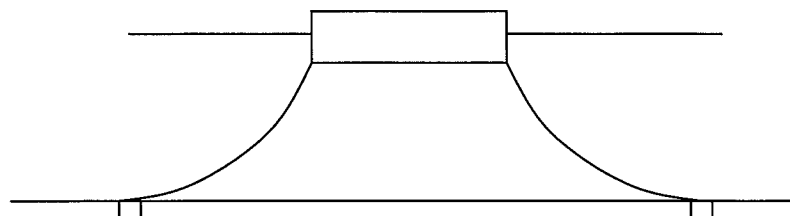


図-2.1.2 カテナリー係留

(2) ドルフィン係留

ドルフィン係留は、海底に支持されたドルフィン及び浮体橋梁との間に設置されるゴムフェンダー（緩衝材）などにより浮体を係留する方法である。固定式構造のため比較的小さい水深に適用される。占有面積が小さく、水平変位が抑制できる点が長所である。

① 緩衝材

ドルフィンと浮体構造との間に、緩衝材として定反力フェンダー、暫増型フェンダー、ローラーフェンダーなどがある。定反力フェンダーは、その反力特性から運用時の水平変位を抑制し、かつ、暴風時の係留力を抑制することができる。浮遊式海洋構造物の長期間の係留する方式として適用実績がある。

② 基礎構造

ドルフィンの基礎構造は、重力式、組杭式、ジャケット式がある。基礎構造は、架橋位置の地質条件や水深に応じて選定される。

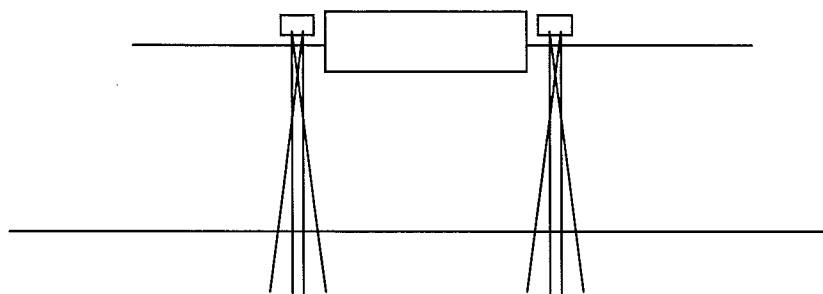


図-2.1.3 ドルフィン係留

(3) T L P 係留 (Tension Leg Platform)

T L P 係留は、チェーン、鋼管テザー、ワイヤーなどのテンドンにより浮体を静的平衡状態よりも下方へ引き込み、それによって生じる過剰浮力と初期張力により浮体を係留する緊張係留方式である。

石油採掘リグとして実績があり、上下動変位を抑制できるため高波浪域にも対応でき、占有面積も小さい。また、大水深での適用では経済的効果大きい。

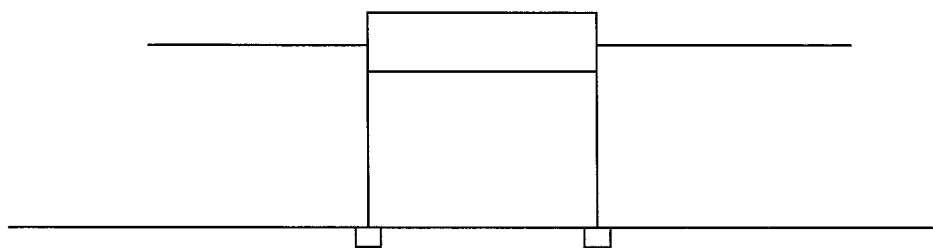


図-2.1.4 T L P 係留

(4) 両端固定係留

両端固定係留は、ポンツーン等の浮体部を直接係留するのではなく、浮体橋梁に作用する荷重を橋梁端部で受け持つ係留方法である。ノルウェーの浮体橋では、浮体橋構造を水平アーチ形状とし、外力に対し構造自体のアーチアクションで抵抗させ、橋梁端部においてフレキシブルロッドやフレキシブルプレートにより定着させる係留方法を採用している。

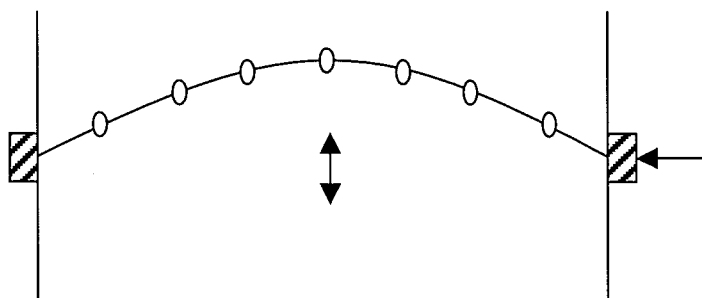


図-2.1.5 両端固定係留

2.2 浮体橋の事例

ここでは、国内および海外で浮体橋が適用された事例を調査した。その結果を表-2.2.1に示す。また、巻末資料に、各事例の概要を載せている。

同表から、浮体橋の適用条件として概ね以下のことがわかった。

- ① 浮体橋の適用位置は水深が概ね 50m 以上で、波高が 2~3m 程度の比較的静穏な場所である（湖やフィヨルドなど）。
- ② 浮体形式では、確認できている橋では全て、連続ポンツーンか分離ポンツーン形式である。
- ③ 係留形式は、アメリカで架設された浮体橋（水深 50~100m 程度）では、ケーブルアンカー（カテナリー係留）が採用されている。ノルウェーでは、水深が深いため（水深 300m 以上）、アンカーレス（上部工のアーチアクションによる抵抗）を採用している。

上記の適用条件と国内の条件を比較するため、国内各地の水深や波浪の観測結果を整理した。その結果を、表-2.2.2 に示した。同表で水深が示されていない箇所は、観測地点が沖合にある箇所である。同表から、波浪観測地点は概ね、水深 20m~50m の範囲にある。また、観測有義波高は、既往最大のものはかなり大きなものも認められるが、平均値としては、概ね 1m 程度以内に収まっている。

浮体橋では、特に、供用時の波浪による動揺が問題となる。この動揺に対する検討に用いる波高は、暴風時ではなく供用時の有義波高を用いるため、平均波高よりもやや大きめの波高となることが考えられる。これらのことを踏まえ、表-2.2.1 の適用事例で確認された適用条件を考慮すると、我が国における浮体橋の適用の可能性は、十分有しているものと考えられる。

表-2.2.1 浮体橋の事例

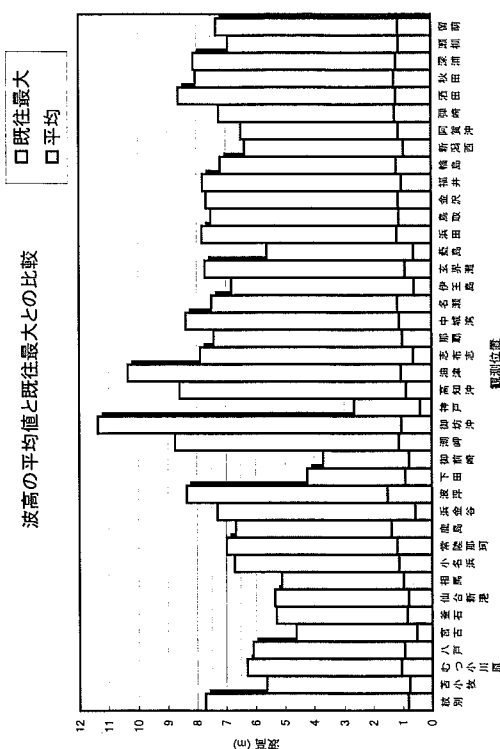
橋名	架橋位置	橋種	完成年度 年	全長 (m)	総幅員 (m)	最大水深 (m)	設計風速	有義波高 (m)	浮体形式	係留形式
Lacey V. Murrow Brg (New)	アメリカ ワシントン湖	道路橋	1992	2013	18.3	66	101km/h	2.44	連続ポンツーン (RC)	ケーブル アンカー
Lacey V. Murrow Brg (Old)	アメリカ ワシントン湖	道路橋	1940	2018	18.3	66	—	—	連続ポンツーン (RC)	ケーブル アンカー
Evergreen Point Brg	アメリカ ワシントン湖	道路橋	1963	2310	18.3	61	136km/h	2.74	連続ポンツーン (RC)	ケーブル アンカー
3rd Lake Washington Brg	アメリカ ワシントン湖	道路橋	1989	1771	32	66	101km/h	2.44	連続ポンツーン (RC)	ケーブル アンカー
Hood Canal Brg (Old)	アメリカ Hood Canal(Puget湾)	道路橋	1961	1972	34ft	104	134km/h	11ft	連続ポンツーン (RC)	ケーブル アンカー
Hood Canal Brg (New)	アメリカ Hood Canal(Puget湾)	道路橋	1983	1066	32.5ft	104	134km/h	11ft	連続ポンツーン (RC)	ケーブル アンカー
Bergsoysund橋	ノルウェー Kristiansund近郊	道路橋	1992	845	—	320	38m/s	1.41	分離独立ポンツーン (PC)	アンカーレス 平面アーチ形状
Nord-Hordland橋 (Salhus橋)	ノルウェー Bergen近郊	道路橋	1994	1246	—	500	27m/s	1.69	分離独立ポンツーン (PC)	アンカーレス 平面アーチ形状
Galta Brg	トルコ イスタンブール	道路橋	1912	457	—	41	—	—	—	ケーブル アンカー
Kelowna Brg	カナダ Okanagan湖	道路橋 (高速道路)	1957	910	—	49	38m/s	1.8	—	埋設アンカー
Hobart Brg	オーストラリア Hobart Derwent River	道路橋	1943	1200	—	31	45m/s	—	—	アンカーレス 平面アーチ形状
夢島舞洲大橋	日本 大阪市北港	道路橋	2001	410	38.8	10	42m/s	1.4	分離独立ポンツーン (鋼製)	フェンダー係留

(注)ーは不明

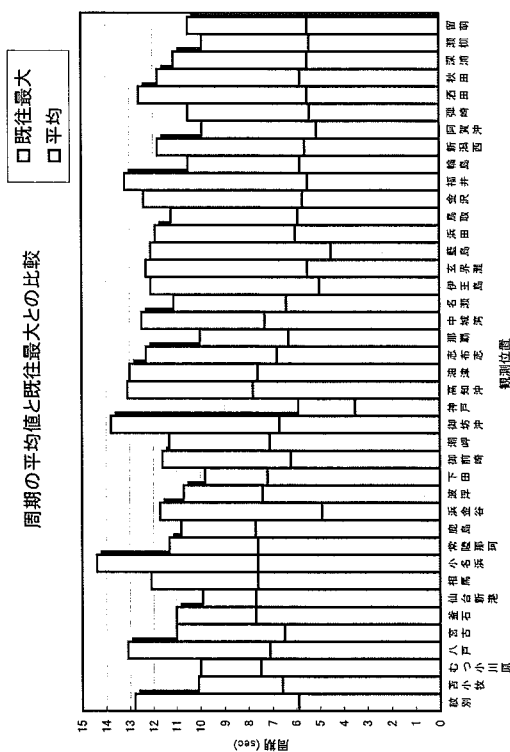
表-2.2.2.2 国内波の浪観測のまとめ

海域	観測点名	水深	波高 $H_{1/3}$ (m)		周期 $T_{1/3}$ (sec)	
			平均	既往最大	平均	既往最大
北海道東	1 紋別	52	0.82	7.73	5.9	12.8
	2 苫小牧	50.7	0.77	5.64	6.6	10.1
	3 むつ小川原	49	1.05	6.29	7.5	10.0
	4 八戸	21	0.94	6.09	7.1	13.1
太平洋北区	5 宮古	23.3	0.52	4.62	6.5	11.0
	6 釜石	49	0.84	5.30	7.7	11.0
	7 仙台新港	20	0.80	5.36	7.7	9.9
	8 相馬	16	0.97	5.12	7.6	12.1
	9 小名浜	20	1.12	6.71	7.6	14.4
	10 常陸那珂	30	1.19	6.99	7.6	11.3
	11 鹿島	22	1.38	6.67	7.7	10.8
	12 浜金谷	22	0.57	7.30	4.9	11.7
	13 波浮	49.3	1.51	8.36	7.4	10.7
	14 下田	50	0.90	4.24	7.2	9.8
	15 御前崎	17	0.78	3.70	6.2	11.6
太平洋中区	16 潮岬	50.5	1.12	8.77	7.1	11.3
	17 御坊沖	-	1.04	11.37	6.7	13.8
	18 神戸	17	0.39	2.66	3.5	5.9
	19 高知沖	-	0.87	8.60	7.8	13.1
太平洋南区	20 油津	50	1.05	10.34	7.6	13.0
	21 志布志	35	0.63	7.88	6.8	12.3
	23 那覇	51	1.01	7.41	6.3	10.0
	24 中城湾	53	1.10	8.39	7.3	12.5
沖縄海区	22 名瀬	50.7	1.16	7.49	6.4	11.1
	25 伊王島	50	0.60	6.81	5.0	12.1
	26 玄界灘	45	0.91	7.72	5.5	12.3
	27 藍島	20.7	0.62	5.61	4.5	12.1
東支那海区	28 浜田	51	1.18	7.81	6.0	11.9
	29 鳥取	30	1.10	7.51	5.9	11.2
	30 金沢	20.2	1.13	7.67	5.7	12.4
	31 福井	21.3	1.02	7.79	5.5	13.2
日本海南区	32 輪島	50	1.20	7.19	5.8	10.5
	33 新潟西	22.7	0.94	6.34	5.6	11.8
	34 阿賀沖	-	1.12	6.46	5.1	9.9
	35 津崎	54	1.24	7.23	5.4	10.5
日本海北区	36 酒田	14	1.20	8.63	5.5	12.6
	37 秋田	-	1.28	8.03	5.8	11.8
	38 深浦	49.6	1.20	8.10	5.5	11.1
	39 瀬棚	52.9	1.11	6.91	5.4	9.9
北海道西	40 留萌	50	1.13	7.33	5.5	10.5

波高の平均値と既往最大との比較



周期の平均値と既往最大との比較



出典：港湾技研資料 NO. 744 Mar. 1993 全国港湾海洋波浪観測20年統計(1970-1989)

3 動揺量推定手法の開発

3.1 概要

これまで、弾性変形の影響が少ないマッシブな浮体構造や小規模の浮体構造の動揺量を推定する手法として、周波数応答解析が多く用いられてきた。これは、浮体部が波浪から受ける流体力が周波数依存性を有するためである。一方、浮体構造の係留形式としては、チェーン係留、ゴムフェンダーを用いたドルフィン係留等の実績があり、これらの係留系はいずれも非線形の復元力特性を持つ。非線形の復元力特性は、浮体構造が受ける風や流体力の荷重レベルが大きくなるにつれ、浮体構造の挙動に与える影響が大きくなる。そのため、浮体構造の動揺量を精度良く推定するためには、非線形の復元力特性を考慮したシミュレーションが必要となる。

以上を踏まえ、本章では、弾性変形の影響を無視できない連続桁形式を有する分離ポンツーン式浮体橋を対象に、京都大学等への委託研究により、以下に示す動揺量（変位、速度、加速度）推定手法の開発を行った。

- ① 周波数応答解析法の多径間浮体橋への拡張（弾性影響の考慮）
- ② 係留系の非線形特性を考慮できる時刻歴応答解析法の開発

ここで開発した手法は、図-3.1.1に示す手順で動揺量を推定するものである。また、開発した動揺量推定手法の精度を確認するため、過去の実験や本研究で新たに実施した模型実験との検証を行うとともに、それぞれの推定手法の整合性の確認を行った。また、開発した動揺量推定手法の実用化を目的に、同計算の計算プログラム化を図った。

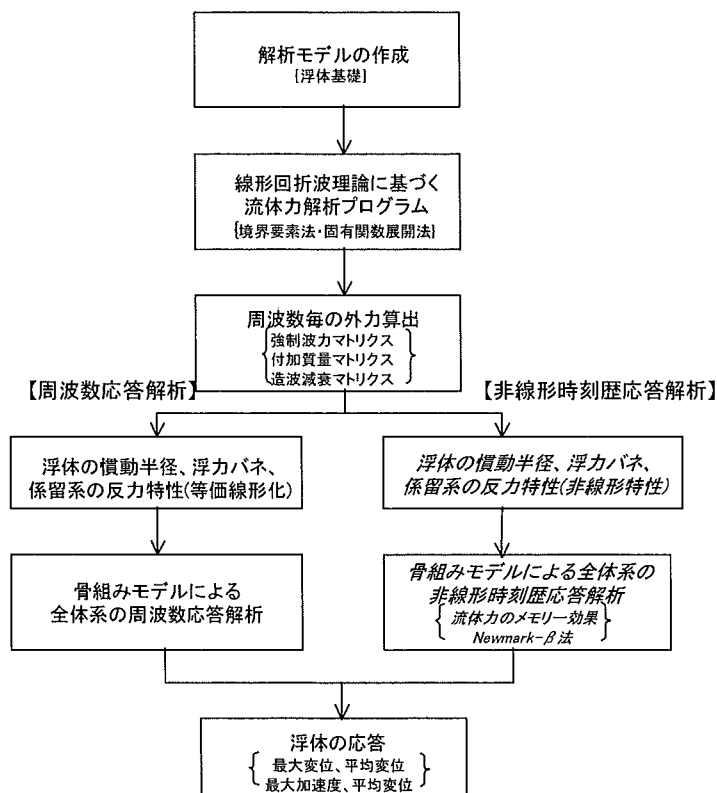


図-3.1.1 動揺量推定手法の概要

3.2 周波数応答解析

3.2.1 解析手法の概要

浮体橋の弾性影響を考慮した波浪応答(動揺量)を求めるため、波浪力等の外力に対して周波数領域での応答を算出する周波数応答解析手法を開発した。本手法は、一般的な橋梁解析に用いられる3次元弾性骨組モデルに、流体力を付加質量および造波減衰として考慮し、式(3.2.1)に示す線形運動方程式の解から規則波応答(周波数応答関数)を算出し、波スペクトルと重ね合わせることで不規則波中の動揺量を推定するものである。

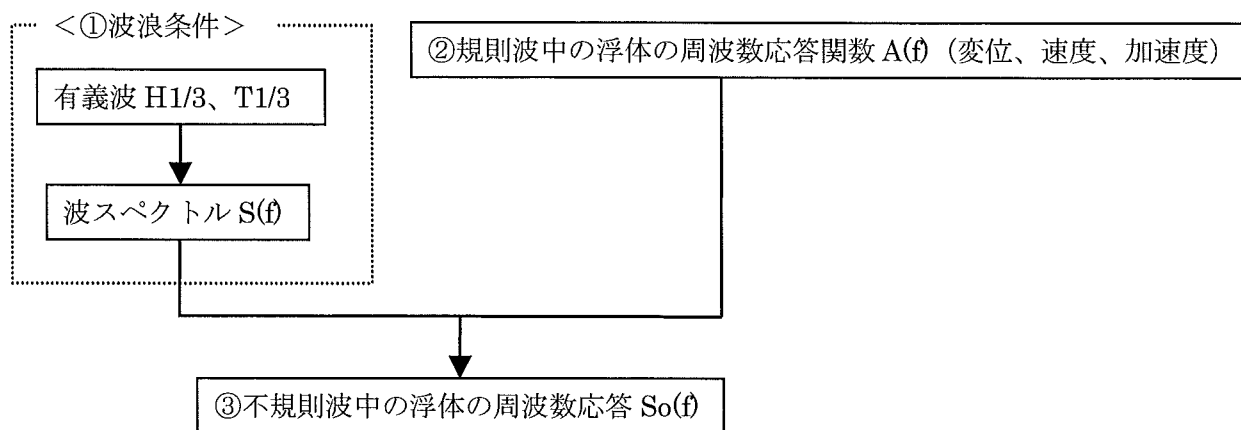


図-3.2.1 周波数応答関数による動揺量推定フロー

浮体基礎に作用する流体力(強制波力、付加質量、造波減衰等)については、ディフラクション・ラディエーション流体力を線形回折波理論に基づいた境界要素法(3次元特異点分布法)^{6) 7)}により算出する。なお、当手法は取り扱いの汎用性を高めるため、汎用構造解析プログラム NASTRAN を採用することとした。

(1) 有義波と波スペクトル

波のスペクトルは、波の特性を周波数ごとに分布する波のエネルギーで表したものである。海の波スペクトルは、世界各地で多くの波浪記録波が解析されており、その特性が比較的良好にわかっている。ここでは、最もよく使われている有義波と波スペクトルとの関係として Bretschneider & 光易により提案されている近似式¹⁾ (3.2.1) を用いて波スペクトルを算出することとした。

$$S(f) = 0.257 \cdot H_{1/3}^2 \cdot T_{1/3} \cdot (T_{1/3} \cdot f)^{-5} \cdot \exp[-1.03 \cdot (T_{1/3} \cdot f)^{-4}] \quad (3.2.1)$$

ここに、

$S(f)$: 波スペクトル密度関数 ($m^2 \cdot s$)

$H_{1/3}$: 有義波高(m)

$T_{1/3}$: 有義波周期(s)

f : 波の周波数

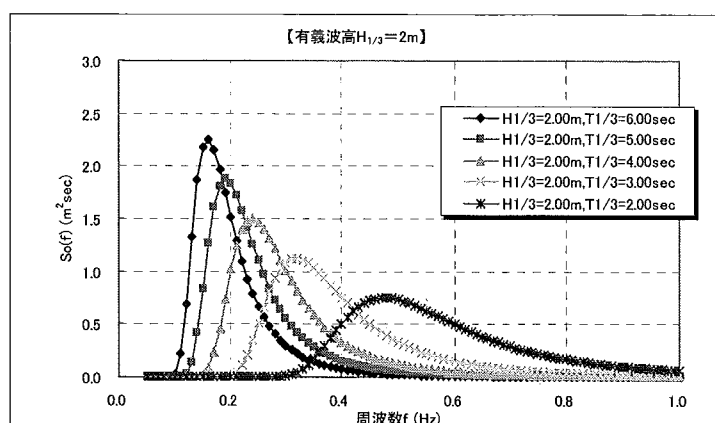


図-3.2.2 Bretschneider&光易の波スペクトル $S(f)$ の例

(2) 規則波中の浮体橋の周波数応答関数

波は、波長に対する波高の比が小さい場合には微小振幅波として取り扱うことができる。また、浮体運動が微小であると仮定すると、非線形減衰項は等価線形化法、復元力項は浮体運動および係留系の変形が微小であるとみなして線形化することが可能である。このように、周波数応答解析では、抗力などを線形化することで線形理論にもとづいた式 (3.2.2) の線形運動方程式から浮体運動を推定するものである。

ある規則波中の浮体の周波数応答関数 $A(f)$ については、周波数ごとの付加質量、造波減衰、および強制波力を求め、これを式 (3.2.2) に入力し解を求めることで、任意の周波数ごとの応答（変位、速度、加速度）を算出する。

$$([S] + [S_A] + [S_B] + i\omega ([B] + [B_A] + [B_D]) + \omega^2 ([M] + [M_A])) \{D\} = \{E\} \quad (3.2.2)$$

ここに、

$[M]$: 質量行列

$[M_A]$: 付加質量行列

$[B]$: 減衰行列

$[B_A]$: 造波減衰行列

$[B_D]$: 等価造渦減衰行列

$[S]$: 剛性行列

$[S_A]$: 浮力復元行列

$[S_B]$: 線形バネ行列

$\{D\}$: 節点変位

$\{E\}$: 波強制力ベクトル

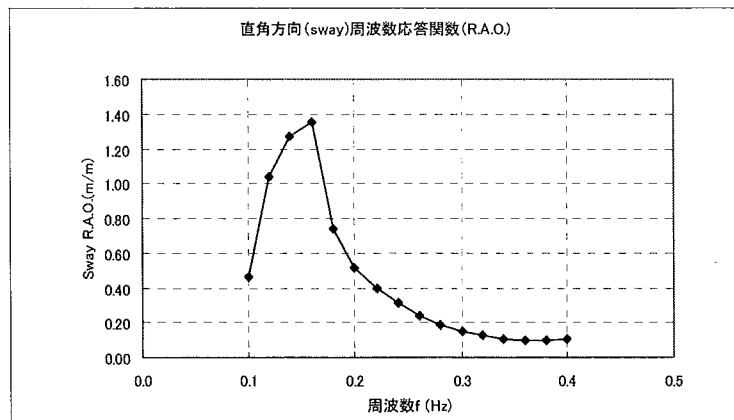


図-3.2.3 周波数応答関数 $A(f)$ の例

(3) 不規則波中の浮体橋の周波数応答関数

不規則波中における周波数応答は、規則波に対する解を線形重ね合わせすることによって求めることができる。すなわち、浮体の周波数応答関数 $A(f)$ が与えられると、不規則波中の浮体の応答スペクトル $S_o(f)$ は式 (3.2.3) に示すように、規則波中の浮体の周波数応答関数 $A(f)$ の二乗と波スペクトル密度関数 $S(f)$ との積で算出する。(この方法を重ね合わせの原理といい、この原理に基づく方法を線形重ね合わせ法という)。

$$S_o(f) = |A(f)|^2 \cdot S(f) \quad (3.2.3)$$

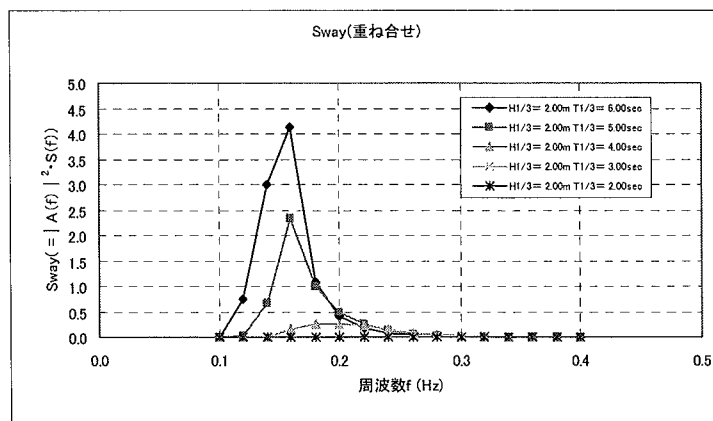


図-3.2.4 応答スペクトル $S_o(f)$

(4) 応答値の算出

波高の極値分布が Rayleigh 分布にしたがうと仮定すると、応答スペクトルの面積 (図-3.2.4) で $f=0 \sim f=\infty$ までのスペクトルに囲まれた面積) から応答の分散 σ^2 が求められる。また、この分散 σ^2 と応答値 $X_{1/3}$ は、下式の統計的關係が成り立つ²⁾。

$$X_{1/3} = 2.0 \cdot \sqrt{\sigma^2} \quad (3.2.4)$$

3.2.2 解析手法の検証

(1) 概要

浮体橋の波浪動揺解析手法の妥当性を検証するため、夢舞連絡橋の水理模型実験結果との比較を行った。

実験の内容・結果については、「夢洲～舞洲連絡橋（仮称）架設工事に伴う水理模型実験（その2）波浪中弾性応答実験報告書」（平成9年8月、三菱重工業㈱）でその詳細が述べられているが、以下、関連する部分の概要を述べる。

- ① 供試模型は、応答特性確認用模型として実橋をできるだけ模擬するように作成されている。
- ② 供試模型の縮尺比は 1/40 である。フルードの相似則に基づく。
- ③ フェンダーの反力特性は、線形バネ（9.8MN/m）で近似されている。従って、実験結果には、係留系の非線形反力特性は反映されていない。

比較対象とした実験の主要なパラメータは下記のとおりである。

- ・水路内設置，水深 11.7m，ポンツーン喫水 4.4m
- ・波高 1.4m，波方向 108°
- ・係留バネ：実機対応（実験では，実機対応の係留バネと，バネ係数を 1/2 にしたモデルの2種類の実験がおこなわれている）
- ・規則波実験（波周期 4～12 秒，1 秒毎）

(2) 境界要素法による線形流体力の解析

水波グリーン関数を用いた境界要素法プログラムにて，幅 58m，長さ 58m，喫水 4.4m，隅切り半径 14m，水深 11.7m 時の単体ポンツーンの流体力（付加質量，造波減衰，強制波力）の計算をおこなった。周期 $T=3$ 秒～13 秒の 1 秒毎，また，波入射方向は 288° とした。そのメッシュ図を図-3.2.5 に示す。

注）波入射方向は 288° は、ここで用いた境界要素法プログラムでの波入射方向の指定が $180^\circ + \alpha$ （入射角）で指定するためであり、実験との整合はとれている。

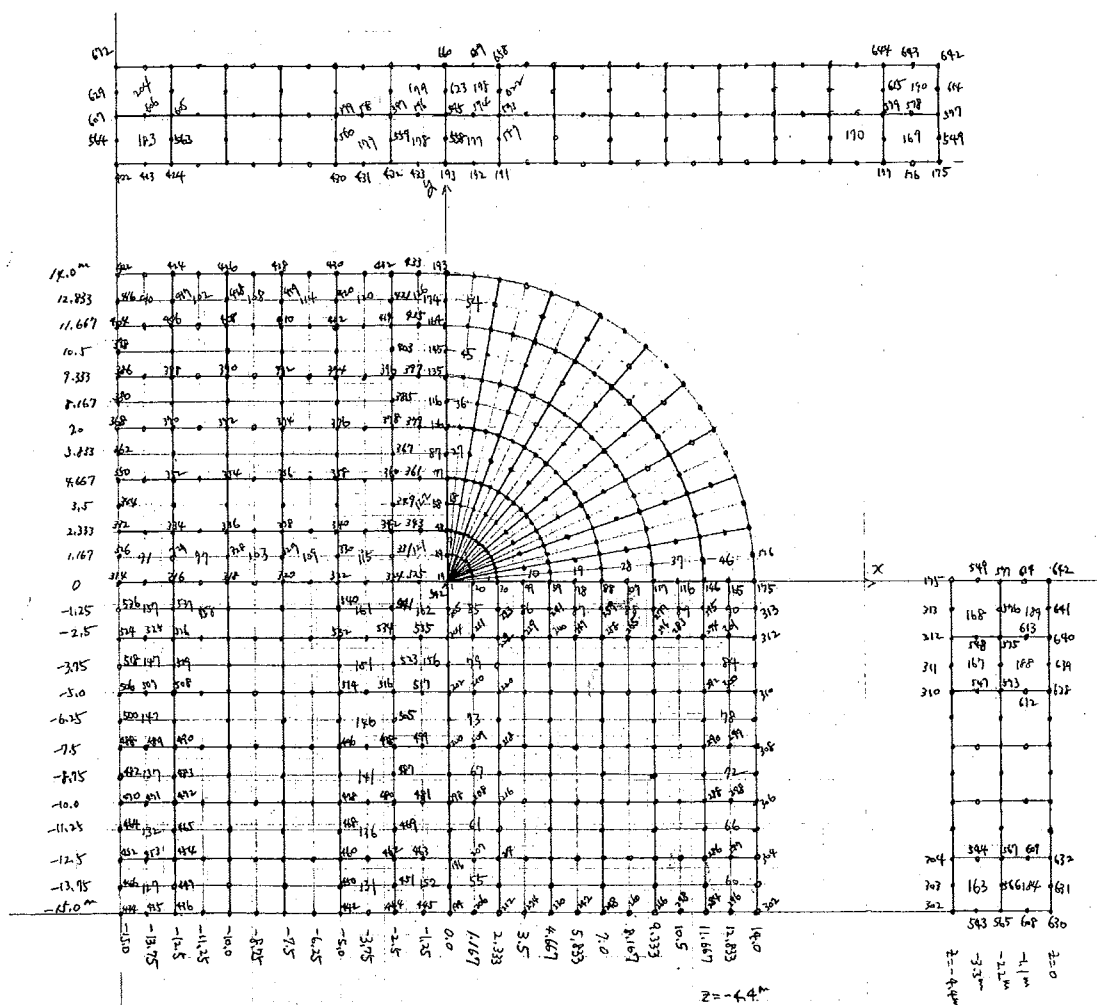


図-3.2.5 ポンツーン没水部メッシュ図

(3) 固有振動解析結果

(2) で求めた付加質量を、浮体基礎の浮面心に設けた節点に 6×6 の対称マトリクスとして入力した。ここで用いる付加質量は周波数に依存する付加質量であり、付加質量を計算したときの振動数(周期)と、この付加質量を考慮した固有振動数解析で得られた固有振動数(固有周期)とが一致する場合の付加質量である。表-3.2.1 の解析結果において、太字のモードで振動数(周期)がほぼ一致している(右端に示した()内の数字がモード次数をあらわしている)。したがって、これらが付加質量を考慮したときの固有振動数となる。なお、参考までに、夢舞 JV で用いられた、周波数非依存の付加質量(対角項のみ考慮)に対する固有振動解析の結果を表-3.2.2 に示す。

表-3.2.1 水中固有振動解析の結果

Added Mass at T=11sec					
MODE NO.	EXTRACTION ORDER	EIGENVALUE	RADIANS	CYCLES	PERIODS
1	1	3.306603e-01	5.750307e-01	9.151898e-02	10.92669 (1)
2	2	3.315057e-01	5.757653e-01	9.163589e-02	10.91275 (2)
3	3	3.349530e-01	5.787513e-01	9.211113e-02	10.85645 (3)
4	4	1.063827e+00	1.0313.20e+00	1.641556e-01	
5	5	1.699545e+00	1.303666e+00	2.074849e-01	
6	6	2.871092e+00	1.694430e+00	2.696768e-01	
7	7	4.7463.25e+00	2.178629e+00	3.467396e-01	
8	8	5.257754e+00	2.292979e+00	3.649390e-01	
9	9	5.444565e+00	2.333359e+00	3.713656e-01	
10	10	1.654138e+01	4.067110e+00	6.473006e-01	
11	11	2.379264e+01	4.877770e+00	7.763212e-01	
12	12	2.379300e+01	4.877807e+00	7.763271e-01	
13	13	2.381627e+01	4.880191e+00	7.767066e-01	
14	13.2.	381627e+01	4.880191e+00	7.767066e-01	
15	15	4.584529e+01	6.770915e+00	1.077625e+00	
Added Mass at T=06sec					
1	1	3.489443e-01	5.907151e-01	9.401522e-02	
2	2	3.701318e-01	6.083845e-01	9.682740e-02	
3	3	3.740999e-01	6.116371e-01	9.734506e-02	
4	4	1.165891e+00	1.079764e+00	1.718498e-01	5.819035 (4)
5	5	1.811861e+00	1.346054e+00	2.13.2311e-01	
6	6	2.845372e+00	1.686823e+00	2.684662e-01	
7	7	5.406594e+00	2.325208e+00	3.700684e-01	
8	8	5.454858e+00	2.335564e+00	3.717165e-01	
9	9	5.711194e+00	2.389811e+00	3.803501e-01	
10	10	1.741321e+01	4.172914e+00	6.641398e-01	
11	11	2.379410e+01	4.877919e+00	7.763450e-01	
12	12	2.379441e+01	4.877951e+00	7.763500e-01	
13	13	2.381627e+01	4.880191e+00	7.767066e-01	
14	13.2.	381627e+01	4.880191e+00	7.767066e-01	
15	15	4.741589e+01	6.885920e+00	1.095928e+00	
Added Mass at T=05sec					
1	1	3.461291e-01	5.883273e-01	9.363520e-02	
2	2	3.592325e-01	5.993601e-01	9.539112e-02	
3	3	3.630536e-01	6.025393e-01	9.589711e-02	
4	4	1.187647e+00	1.089792e+00	1.734458e-01	
5	5	1.843937e+00	1.357916e+00	2.161191e-01	4.627078 (5)
6	6	2.840091e+00	1.685257e+00	2.682169e-01	
7	7	5.382206e+00	2.319958e+00	3.692328e-01	
8	8	5.43.2010e+00	2.332812e+00	3.712785e-01	
9	9	5.800473e+00	2.408417e+00	3.833115e-01	
10	10	1.757545e+01	4.192308e+00	6.672265e-01	
11	11	2.379395e+01	4.877905e+00	7.7633.26e-01	
12	12	2.379436e+01	4.877946e+00	7.763492e-01	
13	13	2.381627e+01	4.880191e+00	7.767066e-01	
14	13.2.	381627e+01	4.880191e+00	7.767066e-01	
15	15	4.739708e+01	6.884553e+00	1.095711e+00	
Added Mass at T=04sec					
1	1	3.348207e-01	5.786369e-01	9.209292e-02	
2	2	3.379848e-01	5.813646e-01	9.252705e-02	

3	3	3.403100e-01	5.833610e-01	9.284478e-02	
4	4	1.216103e+00	1.102771e+00	1.755114e-01	
5	5	1.893736e+00	1.376131e+00	2.190180e-01	
6	6	2.863418e+00	1.692164e+00	2.693162e-01	3.713107 (6)
7	7	5.324081e+00	2.307397e+00	3.672336e-01	
8	8	5.441760e+00	2.332758e+00	3.712699e-01	
9	9	5.780244e+00	2.403.214e+00	3.8263.25e-01	
10	10	1.757064e+01	4.191734e+00	6.671352e-01	
11	11	2.379356e+01	4.877864e+00	7.763362e-01	
12	12	2.379383e+01	4.877892e+00	7.763406e-01	
13	13	2.381627e+01	4.880191e+00	7.767066e-01	
14	13.2.381627e+01		4.880191e+00	7.767066e-01	
15	15	4.713810e+01	6.865719e+00	1.092713e+00	

Added Mass at T=03sec

1	1	3.096969e-01	5.56503.2e-01	8.857039e-02	
2	2	3.127946e-01	5.592805e-01	8.901224e-02	
3	3	3.355522e-01	5.792686e-01	9.219346e-02	
4	4	1.226732e+00	1.107579e+00	1.762767e-01	
5	5	1.927039e+00	1.388178e+00	2.209354e-01	
6	6	2.914610e+00	1.707223e+00	2.717130e-01	
7	7	5.280807e+00	2.298001e+00	3.657382e-01	2.734196 (7)
8	8	5.469900e+00	2.338782e+00	3.722287e-01	2.686520 (8)
9	9	5.637463e+00	2.374334e+00	3.778870e-01	2.646293 (9)
10	10	1.739793e+01	4.171083e+00	6.638485e-01	1.506367 (10)
11	11	2.379324e+01	4.877831e+00	7.763309e-01	
12	12	2.379328e+01	4.877836e+00	7.763317e-01	
13	13	2.381627e+01	4.880191e+00	7.767066e-01	
14	13.2.381627e+01		4.880191e+00	7.767066e-01	
15	15	4.674133e+01	6.836763e+00	1.088105e+00	

表-3.2.2 周波数非依存の付加質量に対する固有値解析結果

Constant Added Mass		EIGENVALUE	RADIANs	CYCLES	
MODE NO.	EXTRACTION ORDER				
1	1	2.905553e-01	5.390319e-01	8.578958e-02	11.65643 (1)
2	2	3.171812e-01	5.631884e-01	8.9633.21e-02	11.15646 (2)
3	3	3.199418e-01	5.656340e-01	9.002344e-02	11.10822 (3)
4	4	1.160179e+00	1.077116e+00	1.713.283e-01	5.833343 (4)
5	5	1.872690e+00	1.368463e+00	2.177976e-01	4.591419 (5)
6	6	2.486907e+00	1.576993e+00	2.509862e-01	3.983.283 (6)
7	7	4.888285e+00	2.210947e+00	3.518831e-01	2.841853 (7)
8	8	4.988263e+00	2.23343.2e+00	3.554633e-01	2.813230 (8)
9	9	5.446328e+00	2.333737e+00	3.713.257e-01	2.692329 (9)
10	10	1.708934e+01	4.133926e+00	6.579347e-01	1.519908 (10)
11	11	2.379099e+01	4.877600e+00	7.76293.2e-01	
12	12	2.379115e+01	4.877617e+00	7.762968e-01	
13	13	2.381627e+01	4.880191e+00	7.767066e-01	
14	13.2.381627e+01		4.880191e+00	7.767066e-01	
15	15	4.622902e+01	6.799193e+00	1.082125e+00	

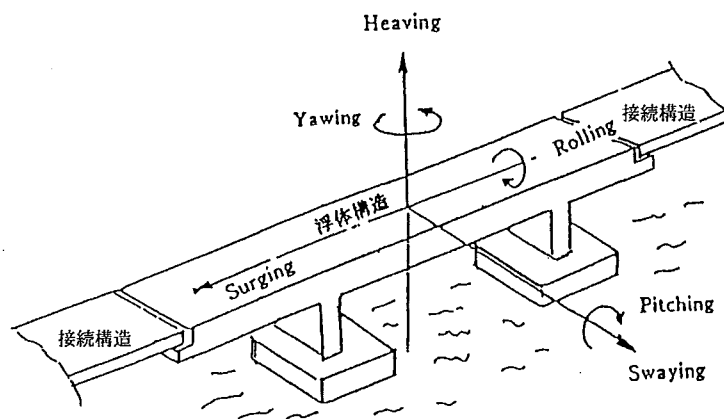
表-3.2.1の第1次～第10次モードに対する固有モード形状を、図-3.2.6～図-3.2.15に示す。固有モード形状から、固有振動実験で得られているそれぞれの固有振動数との比較を行った結果を表-3.2.3に示す。同表より、固有振動解析の結果は、模型実験結果とほぼ一致していることがわかる。ただし、鉛直曲げモードについては、この実験で用いられている上部工の模型が主にねじりモードに着目し製作されているため（ねじり剛性を合わせている）、若干、誤差が生じている。

注）解析と実験との固有モードの発現順序が異なっているモードは、固有モードの形状が同じものを対応する固有モードとした。

表-3.2.3 固有周波数の比較

モード	模型実験 (実機換算)	詳細解析 (周波数依存)	解析/模型	簡易解析 (周波数非依存)	解析/模型
鉛直(ヒープ)	11.163	10.913	0.978	11.156	0.999
橋軸回り(ロール)	11.138	10.856	0.975	11.108	0.997
直角回り(ピッチ)	11.049	10.927	0.989	11.656	1.055
橋軸(サージ)	5.679	5.819	1.025	5.833	1.027
直角(スウェー)	4.478	4.627	1.033	4.591	1.025
桁ねじり	3.738	3.713	0.993	3.984	1.066
鉛直回り(ヨー)	2.650	2.646	0.998	2.692	1.016
桁鉛直逆対称曲げ	2.157	2.734	1.268	2.842	1.318
桁鉛直対称曲げ	1.594	2.687	1.686	2.813	1.765
桁水平曲げ	1.467	1.506	1.027	1.520	1.036

モード名称の定義



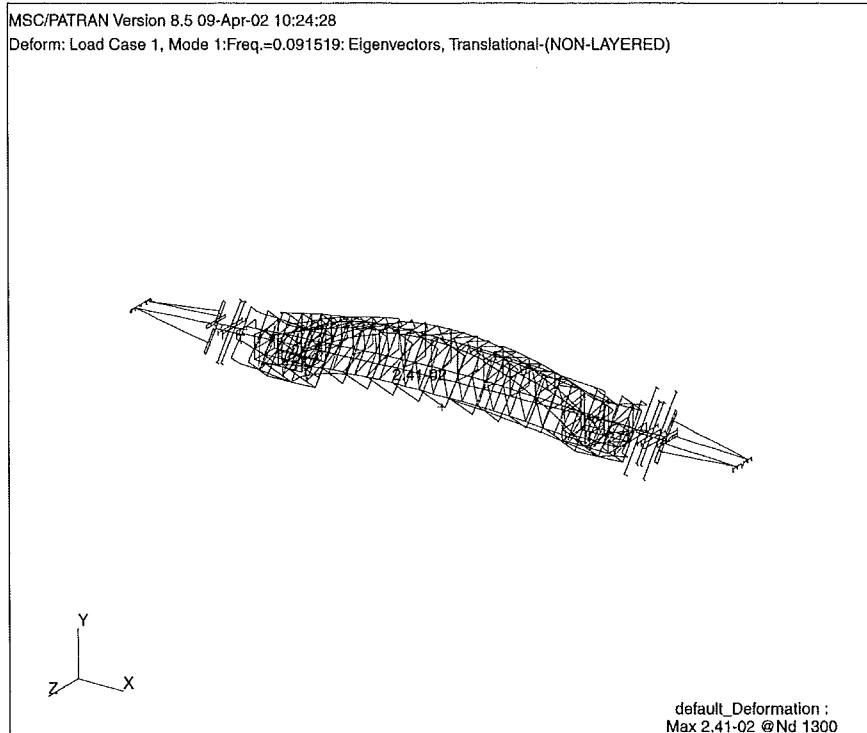


図-3.2.6 第1次モード (ロール)

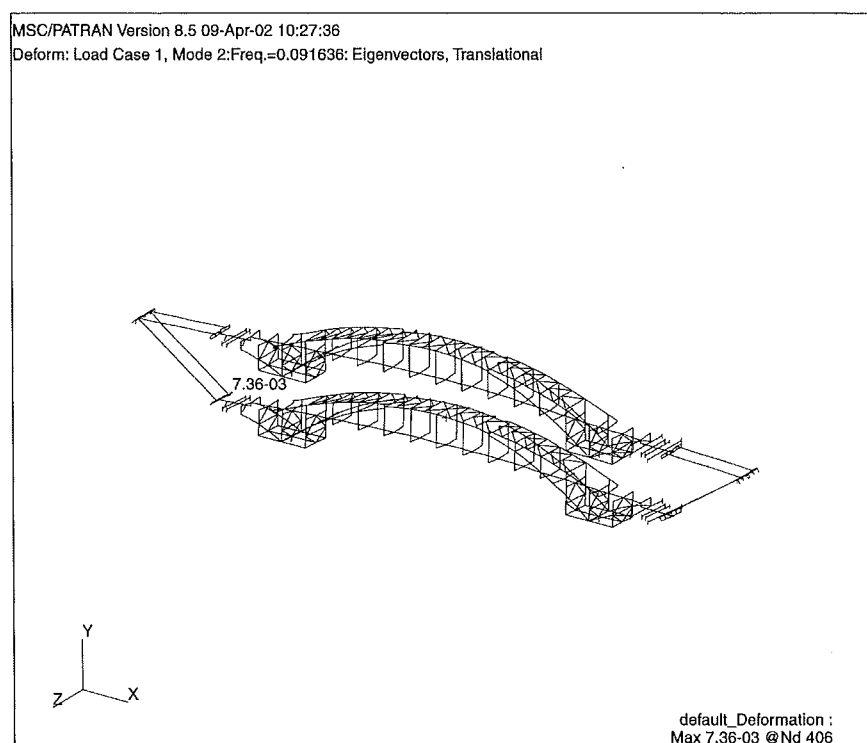


図-3.2.7 第2次モード (ヒープ)

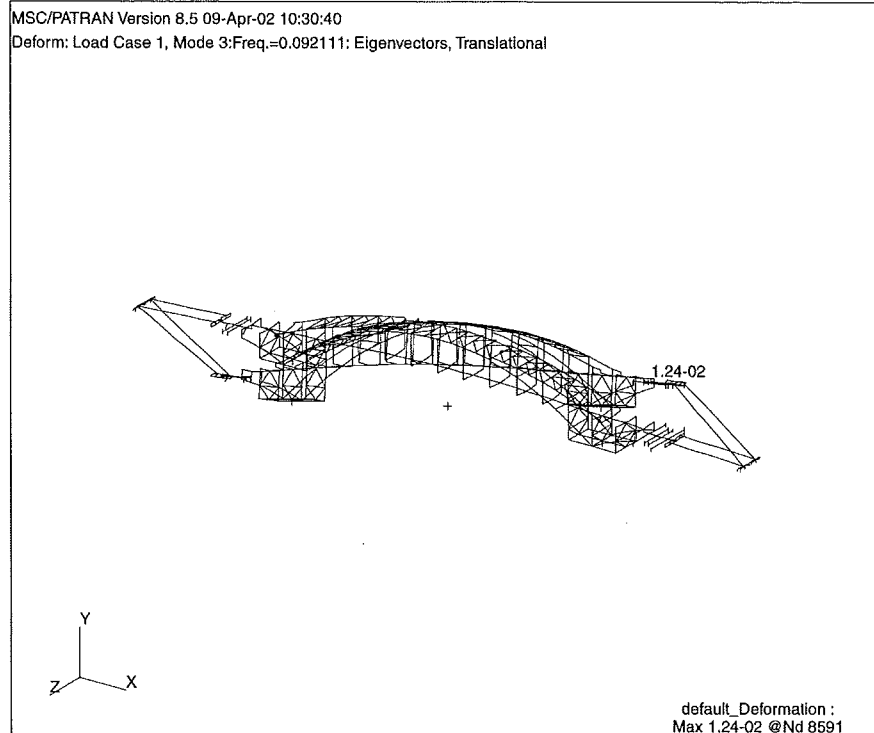


図-3.2.8 第3次モード (ピッチ)

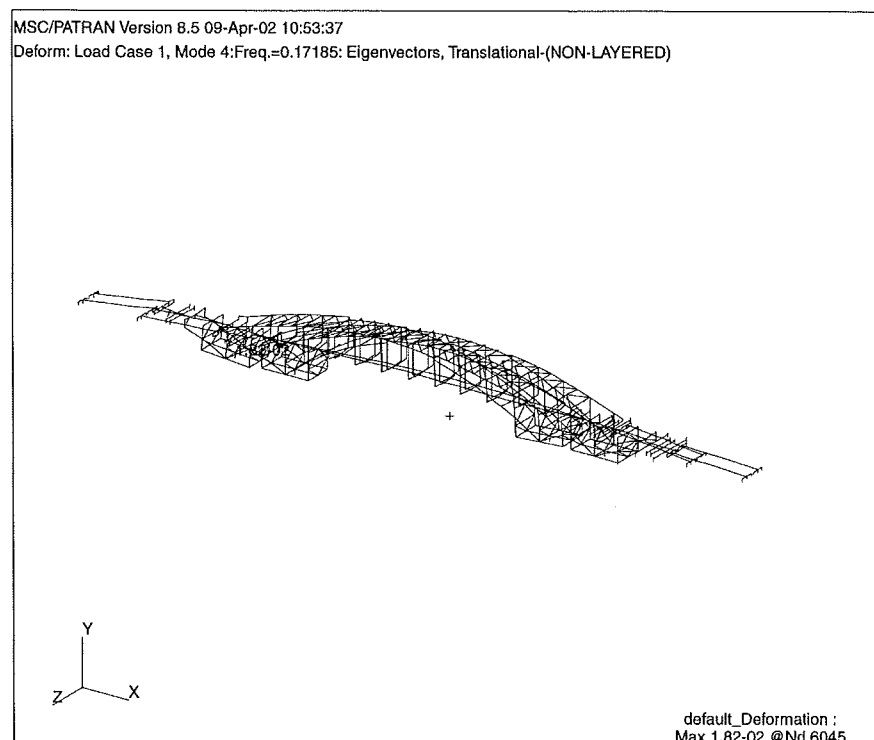


図-3.2.9 第4次モード (サージ)

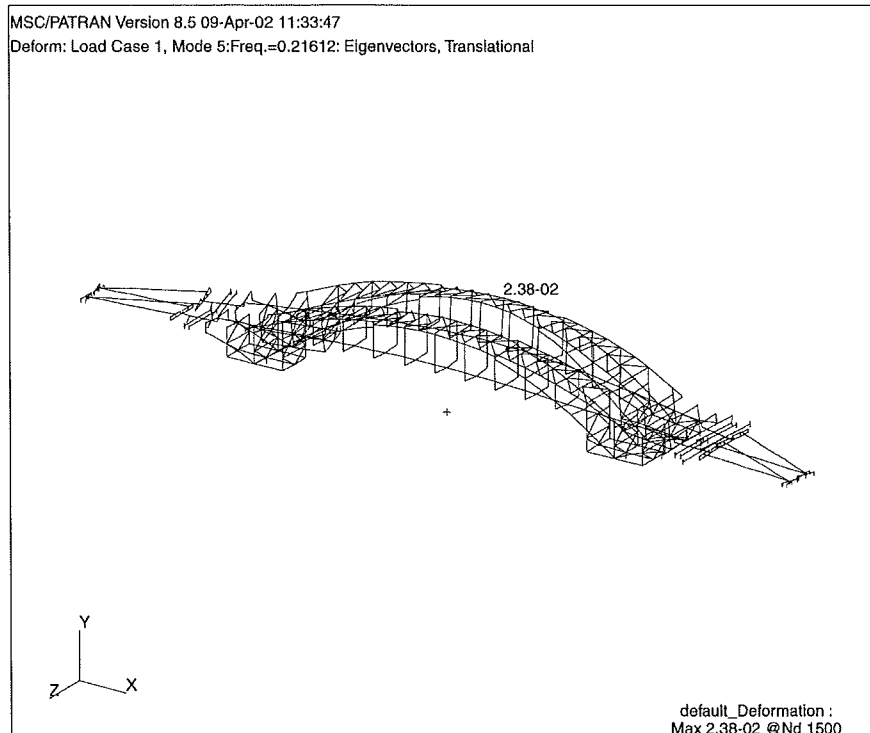


図-3.2.10 第5次モード (スウェー)

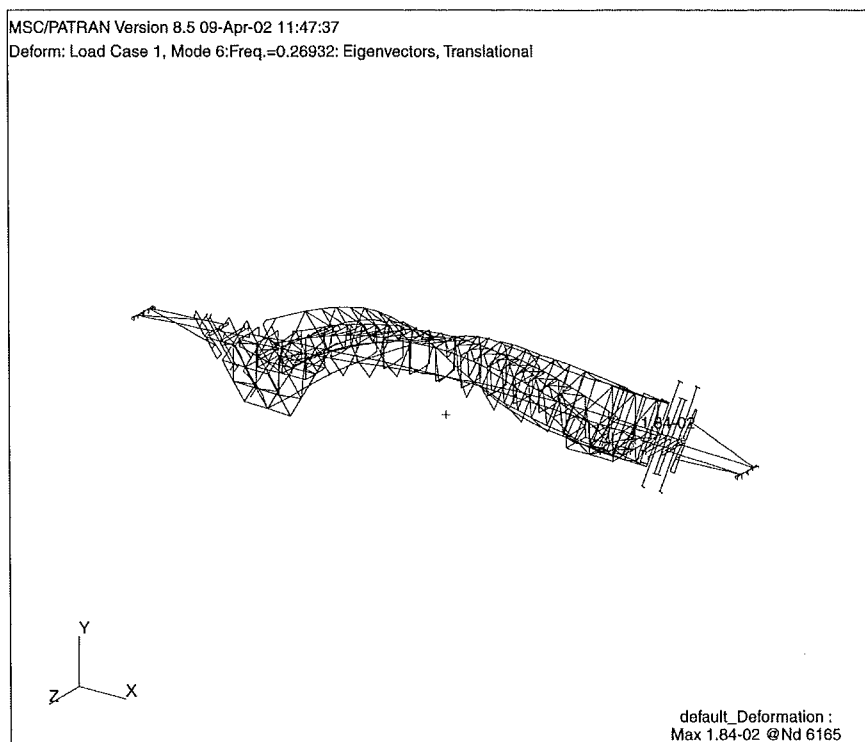


図-3.2.11 第6次モード (ねじり)

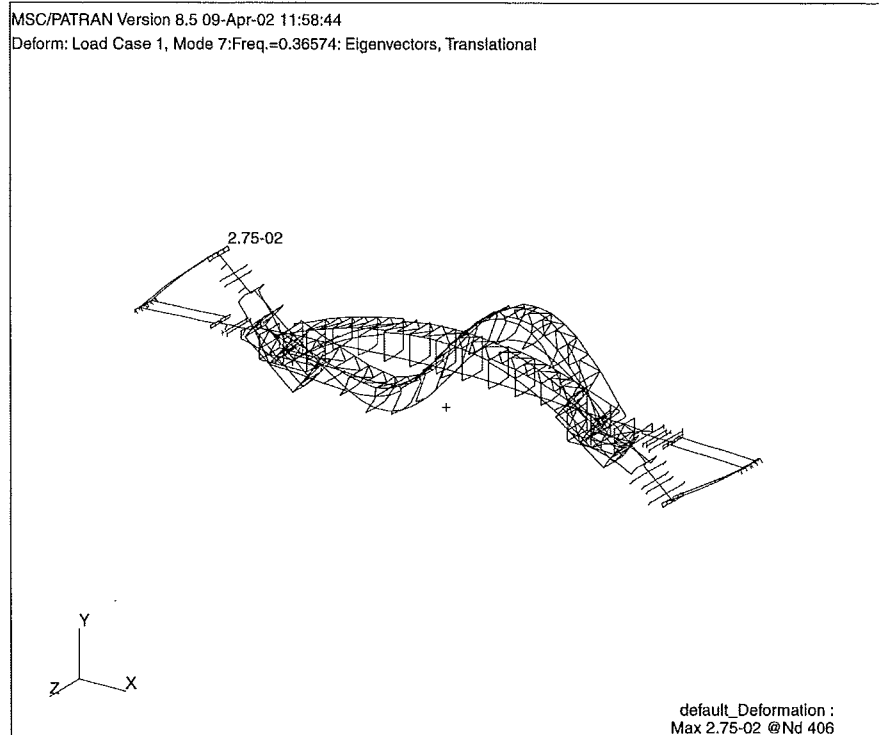


図-3.2.12 第7次モード (鉛直逆対称)

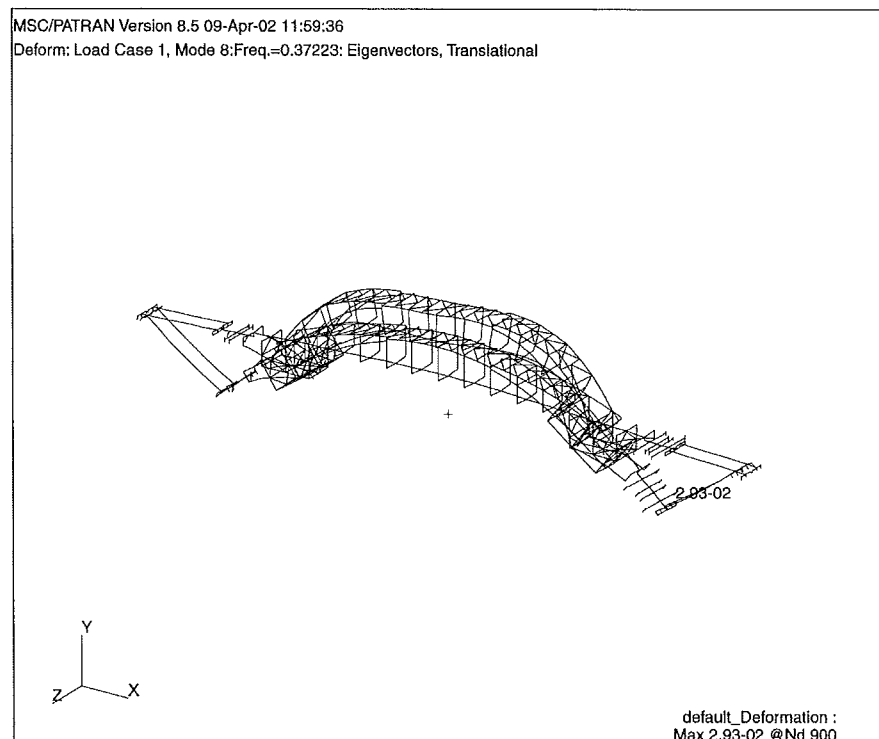


図-3.2.13 第8次モード (鉛直対称)

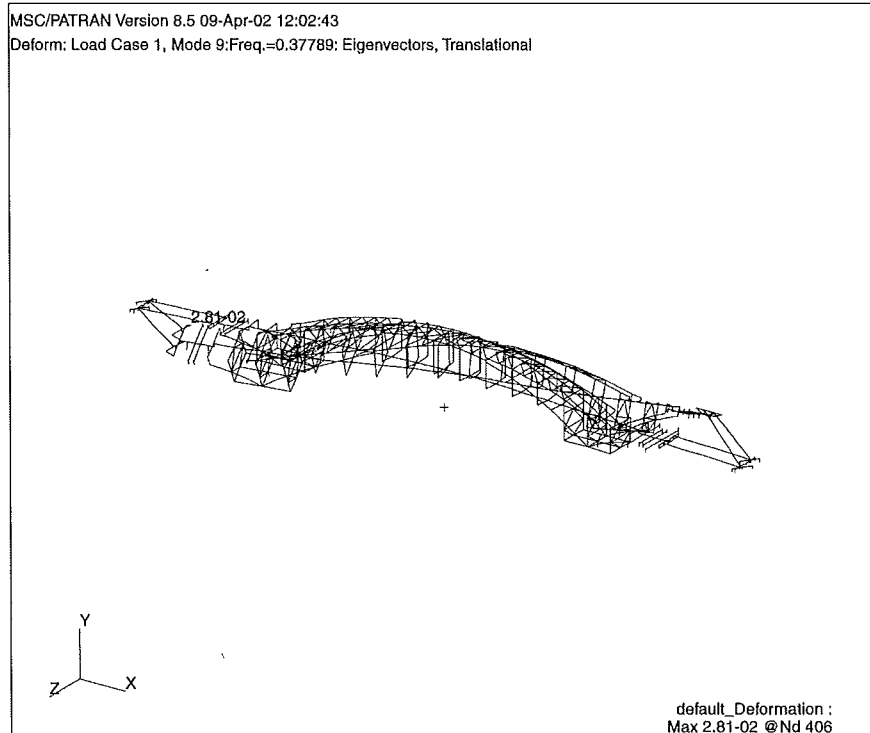


図-3.2.14 第9次モード (ヨ一)

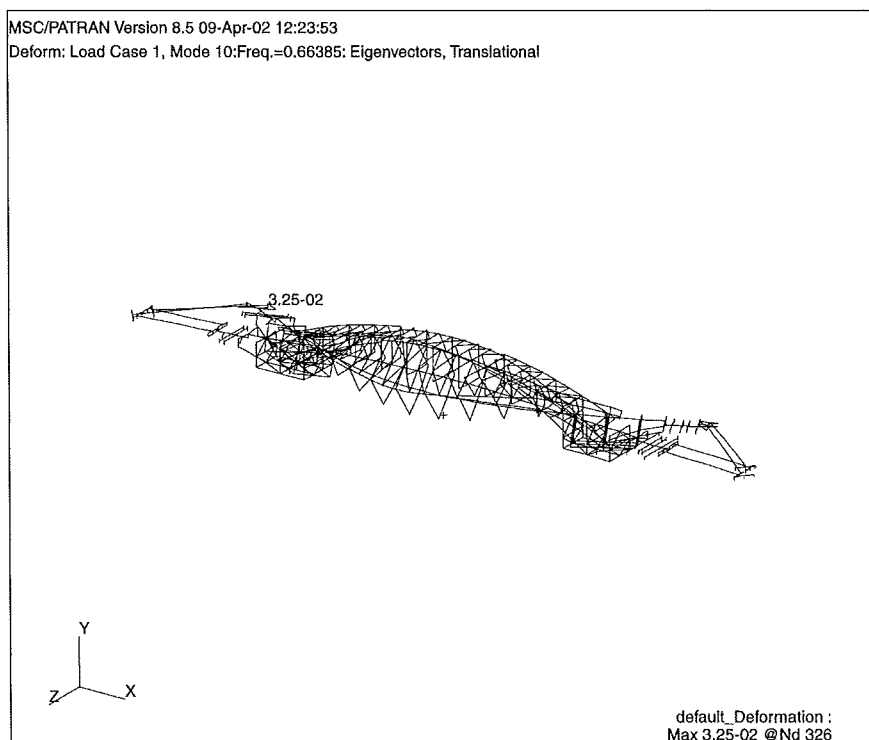


図-3.2.15 第10次モード (水平曲げ)

(4) 周波数応答解析結果

周波数毎に得られた付加質量，造波減衰係数，ならびに一次強制波力の各データをポンツーン浮面心位置に設けた節点にその特性値を入力し，また強制波力は調和加振力として与える。

得られた結果を実験値と比較して図-3.2.16～図-3.2.18 に示す。いずれも単位片振幅波高あたりの応答値であり，周波数応答関数 $A(\omega)$ である。

全体的に、実験値と解析値はよく合っているが，図-3.2.17 および図-3.2.18 の Roll 応答の共振点付近では，解析値が実験値をかなり上回っている。これは，流体の粘性影響に起因する減衰力が解析では考慮されていないためで，skin-friction および eddy-making により生ずる Roll damping として解析に反映させる必要がある。

夢舞 JV においては，実験的検討の結果，Roll 方向のみの造波減衰を 50% 割り増しすることで，解析値と実験値の良好な一致がみられるとしている。そこで，同様な解析を実施し，その結果を図-3.2.19～図-3.2.21 に示す。同図から，解析値と実験値は良好な一致がみられている。これらのことから，夢舞 JV で行われた補正方法は，実験結果が存在する場合には，簡便な補正方法として有効であるものと考えられる。

Roll damping の評価法は，これまで各種提案されてきている、本研究で開発した解析手法では、そのうちのひとつとして，Eddy-making に関する池田(1984)の方法を採用し、Roll damping を評価した。

池田 (1984) によれば、Eddy-making にともなう Roll 運動に関する等価線形減衰定数 B_{eo} は式 (3.2.4) により評価が可能である。

$$B_{eo} = \frac{2}{\pi} \rho L D^4 (H_0^2 + 1 - \overline{OG}/D) [H_0^2 + (1 - \overline{OG}/D)^2] R_0 \omega \quad (3.2.4)$$

ここで、

- ρ : 流体密度
- L : 浮体長
- D : 喫水
- H_0 : 半幅喫水比 (= $B/(2D)$)
- B : 浮体幅
- $\overline{OG}$: 重心の Z 座標 (浮体心 O から下向きを正)
- R_0 : Roll 応答角度
- ω : 周波数

なお、式 (3.2.1) は、Froude の法則にしたがっている。本式により係数を算出した結果を、造波減衰係数の 50% 値と合わせて、表-3.2.4 および図-3.2.22 にそれぞれ示す。Roll 応答共振時となる 11 秒付近 (図-3.2.21 参照) で解析値と実験値とが応答角 3° でほぼ一致することが確認できる。造波減衰係数の 50% 値が実験的に得られた値であることを考えると、式

(3.2.4) に基づき計算される造波減衰値は妥当な値であるものと考えられる。

この Roll damping を考慮して求めた周波数応答を図-3.2.23～図-3.2.25 に示す。解析と実験は 50%割り増しの造波減衰を考慮した場合と同様、良好に一致していることが確認できた。よって、Roll 共振時において、粘性に起因する Roll damping の補正法は十分精度の良いものと判断できる。なお、本補正法は、本研究で開発した周波数応答解析手法に取り込んでいる。

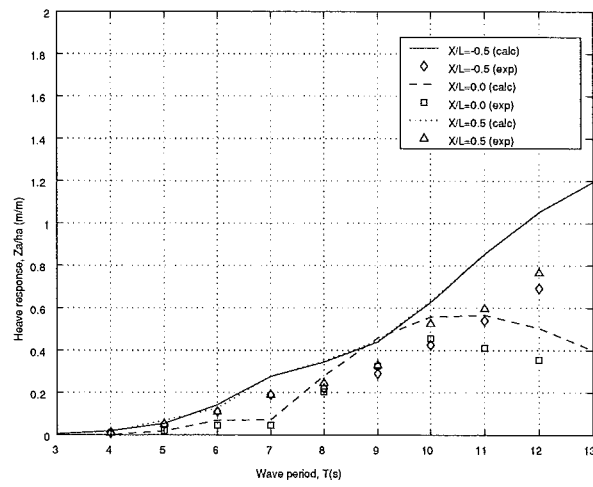


図-3.2.16 Heave 応答変位 (Roll damping 考慮せず)

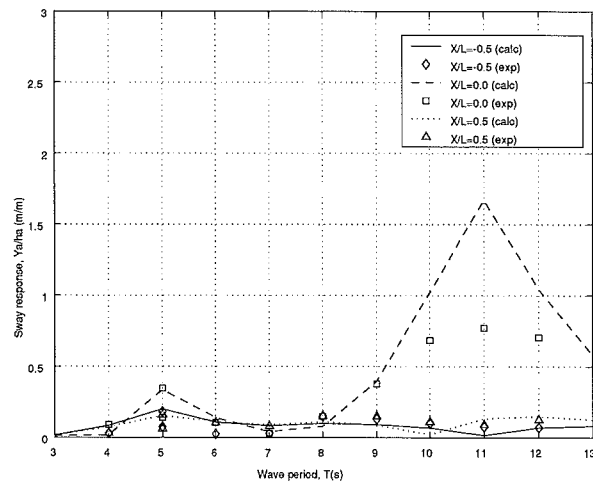


図-3.2.17 sway 応答変位 (Roll damping 考慮せず)

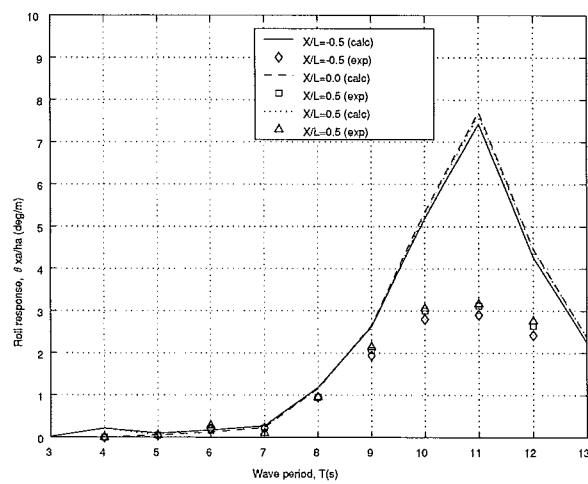


図-3.2.18 Roll 応答変位 (Roll damping 考慮せず)

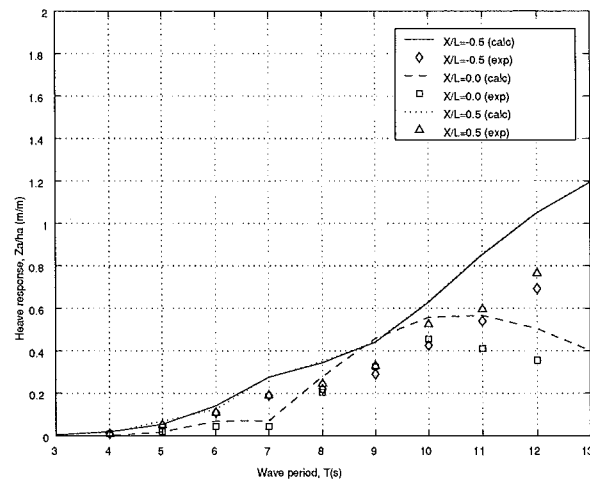


図-3.2.19 Heave 応答変位 (Roll damping として, 造波減衰の 50%を考慮)

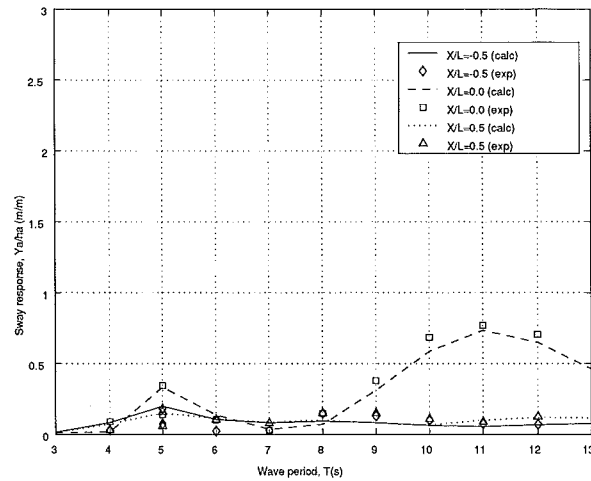


図-3.2.20 Sway 応答変位 (Roll damping として, 造波減衰の 50%を考慮)

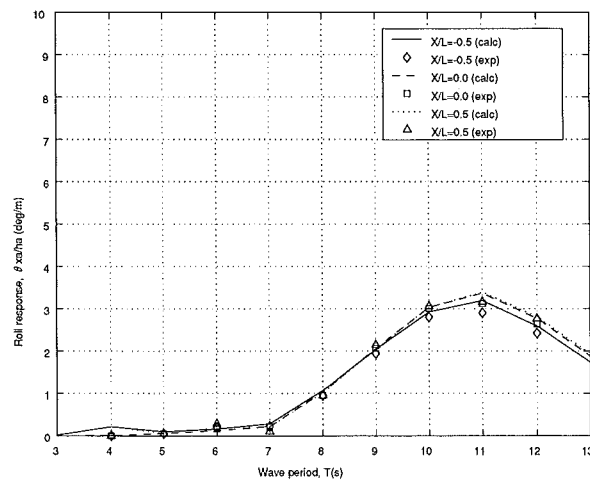
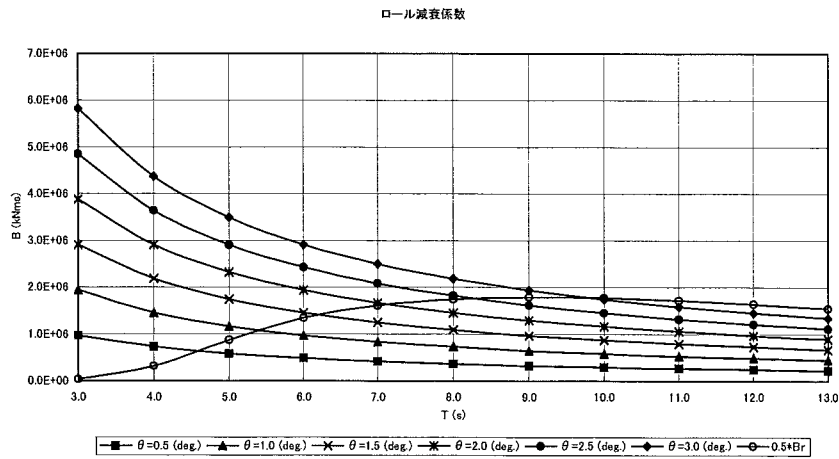


図-3.2.21 Roll 応答変位 (Roll damping として, 造波減衰の 50%を考慮)

表-3.2.4 Eddy-making による Roll 運動に関する等価線形減衰係数 B_{e0}

T(s)	ω (rad/s)	Be0 (kNms) at several R0 (deg.)						Radiation damping	
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	Br (kNms)	0.5Br(kNms)
		8.73E-03	1.75E-02	2.62E-02	3.49E-02	4.36E-02	5.24E-02		
3.0	2.09E+00	9.70E+05	1.94E+06	2.91E+06	3.88E+06	4.85E+06	5.82E+06	6.30E+04	3.15E+04
4.0	1.57E+00	7.28E+05	1.46E+06	2.18E+06	2.91E+06	3.64E+06	4.37E+06	6.34E+05	3.17E+05
5.0	1.26E+00	5.82E+05	1.16E+06	1.75E+06	2.33E+06	2.91E+06	3.49E+06	1.74E+06	8.69E+05
6.0	1.05E+00	4.85E+05	9.70E+05	1.46E+06	1.94E+06	2.43E+06	2.91E+06	2.68E+06	1.34E+06
7.0	8.98E-01	4.16E+05	8.32E+05	1.25E+06	1.66E+06	2.08E+06	2.49E+06	3.22E+06	1.61E+06
8.0	7.85E-01	3.64E+05	7.28E+05	1.09E+06	1.46E+06	1.82E+06	2.18E+06	3.50E+06	1.75E+06
9.0	6.98E-01	3.23E+05	6.47E+05	9.70E+05	1.29E+06	1.62E+06	1.94E+06	3.59E+06	1.79E+06
10.0	6.28E-01	2.91E+05	5.82E+05	8.73E+05	1.16E+06	1.46E+06	1.75E+06	3.56E+06	1.78E+06
11.0	5.71E-01	2.65E+05	5.29E+05	7.94E+05	1.06E+06	1.32E+06	1.59E+06	3.45E+06	1.72E+06
12.0	5.24E-01	2.43E+05	4.85E+05	7.28E+05	9.70E+05	1.21E+06	1.46E+06	3.28E+06	1.64E+06
13.0	4.83E-01	2.24E+05	4.48E+05	6.72E+05	8.96E+05	1.12E+06	1.34E+06	3.09E+06	1.54E+06



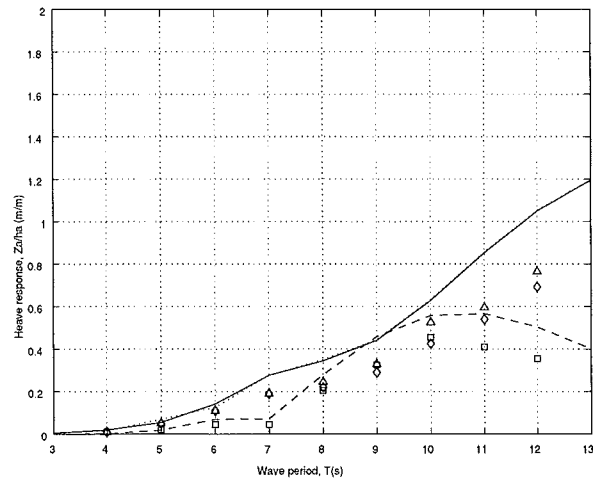


図-3.2.23 Heave 応答変位 (Roll damping として, Eddy-making と Skin-friction を考慮)

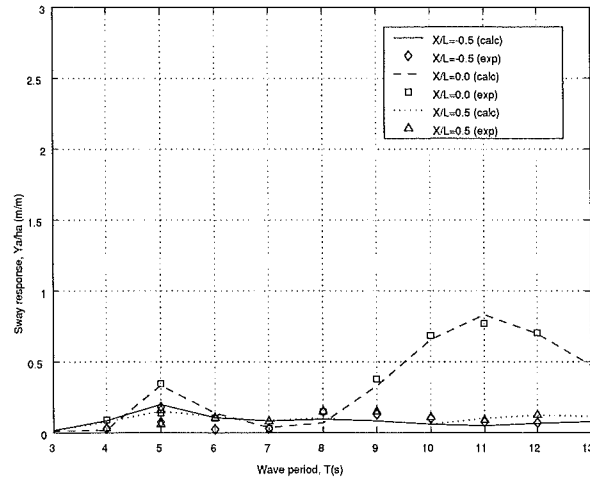


図-3.2.24 Sway 応答変位 (Roll damping として, Eddy-making と Skin-friction を考慮)

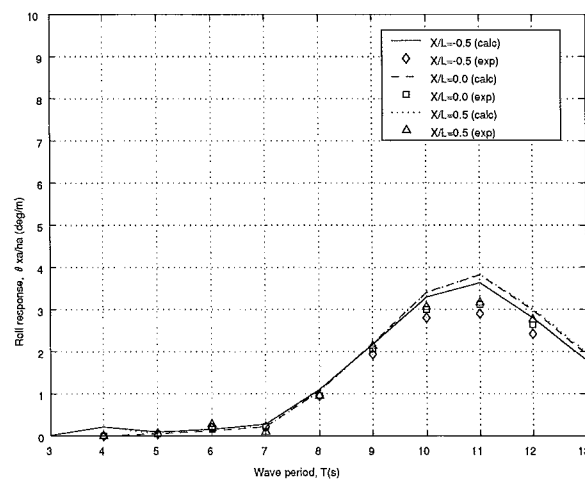


図-3.2.25 Roll 応答変位 (Roll damping として, Eddy-making と Skin-friction を考慮)

3.3 時刻歴応答解析

3.2 項で開発した周波数応答解析による動揺量推定手法は、係留系の非線形復元力特性を考慮することができない。これを正確に考慮するためには、時刻歴応答解析法によらなければならない。そこで、時刻歴応答解析法を基本とした浮体橋の動揺量推定手法を開発した。

3.3.1 解析手法の概要

(1) 基本解法

時刻歴応答解析による動的応答を求める手法は、直接積分法とモード法に分けられる。それぞれの概要は次のとおりである。

①直接積分法：有限要素法で離散化した各節点での変位・速度・加速度を未知量とする運動方程式をそのまま時間領域で解く。

②モード法：構造系の固有値解析から得られる固有モードの重ね合わせとして構造系の応答を表現し、各モードの応答振幅を未知量とする。

有義波は、20 分間の観測波より求められる。時刻歴応答解析では、この有義波諸元（有義波高、有義周期）に基づいて算出された入力波（外力として流体力を時系列に与える）を外力として与える。そのため、動揺量推定に用いる時刻歴応答解析では、シミュレーション時間を 20 分程度とすることが妥当であり、長時間のシミュレーションが必要となる。そこで、本研究では、上記の 2 つの手法の内、計算時間の大幅な短縮化が図れるモード法を基本解法として採用した。

(2) 運動方程式

時刻歴応答解析に用いる運動方程式は、流体力に関するメモリー効果を考慮した式 (3.3.1) を基本とした。

$$\sum_{j=1}^N [\{ m_{ij} + a_{ij}(\infty) \} \ddot{x}_j + B_{ij} \dot{x}_j + C_{ij} x_j] + G_i(x_i) = F_i(t) - \sum_{j=1}^N \int_0^t L_{ij}(\tau) \dot{x}_j(t-\tau) d\tau \quad (3.3.1)$$

$x_i, \dot{x}_i, \ddot{x}_i$: 節点変位、速度、加速度ベクトル

m_{ij} : 質量マトリクス（浮体部＋上部工）

$a_{ij}(\infty)$: 周波数無限大時の付加質量マトリクス

B_{ij} : 線形減衰マトリクス（上部工＋係留系）

C_{ij} : 剛性マトリクス（浮体復元力バネ＋上部工＋線形係留系）

$G_i(x_i)$: 非線形係留力ベクトル（非線形バネ）

$F_i(t)$: 強制外力ベクトルの時系列

$L_{ij}(\tau)$: メモリー影響関数

ここで、メモリー影響関数 $L_{ij}(\tau)$ は、造波減衰係数 $b_{ij}(\omega)$ のフーリエ逆変換から求めることができる。

$$L_{ij}(\tau) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b_{ij}(\omega) \cos \omega \tau d\omega \quad (3.3.2)$$

また、周波数無限大時の付加質量 $a_{ij}(\infty)$ は、次式において適当な ω を設定することによって得られる。

$$a_{ij}(\omega) - a_{ij}(\infty) = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b_{ij}(\omega') \frac{d\omega'}{\omega^2 - \omega'^2} \quad (3.3.3)$$

強制外力 $F_i(t)$ は、風荷重、波荷重、潮流力を考える。

風荷重：定常成分＋変動成分をあわせて、FEM モデルにおける節点荷重の時系列として与える。

波荷重：1次強制波力＋変動波漂流力を、浮体基礎節点位置において、時系列として与える。変動波漂流力において漂流力係数としては浮体固定時のものを使用する。

潮流力：定常外力として与える。

式(3.3.1)を、モード座標系に関する運動方程式として下記のように表すことができる（モード法）。

$$\{\ddot{\zeta}\} + [\phi]^T [B] [\phi] \{\dot{\zeta}\} + [\omega^2] \{\zeta\} = -[\phi]^T \{G(x)\} + [\phi]^T \{F(t)\} - \int_0^t [\phi]^T [L(\tau)] [\phi] \{\dot{\zeta}(t-\tau)\} d\tau \quad (3.3.4)$$

ただし、 $\{x\} = [\phi] \{\zeta\}$ であり、また $[\phi]$ ならびに $[\omega^2]$ は次の固有値問題から求められる。

$$-\omega_r^2 [m + a(\infty)] \{\phi_r\} + [C] \{\phi_r\} = \{0\} \quad (3.3.5)$$

$$[\phi] = [\{\phi_1\}, \dots, \{\phi_M\}] \quad (3.3.6)$$

$$[\omega^2] = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \omega_M^2 \end{bmatrix} \quad (3.3.7)$$

3.3.2 運動方程式

係留系による非線形の復元力を正確に考慮するには、時刻歴応答解析法によらなければならない。しかし一方では、Radiation 流体力である付加質量・造波減衰は周波数依存性を有するため、このままでは時間領域で正確に解析することができない。そこで、流体力のメモリー効果を考慮した式(3.3.8)または式(3.3.9)の運動方程式が、高木・新井ら(1996)³⁾によって示されている。

$$\sum_{j=1}^N \left[\{m_{ij} + \mu_{ij}(\infty)\} \ddot{x}_j + B_{ij} \dot{x}_j + \int_0^t \dot{L}_{ij}(\tau) \dot{x}_j(t - \tau) d\tau + C_{ij} x_j \right] + G_i(x_i) = F_i(t) \quad (3.3.8)$$

$$\sum_{j=1}^N \left[\{m_{ij} + \mu_{ij}(\infty)\} \ddot{x}_j + B_{ij} x_j + \int_0^t L'_{ij}(\tau) \ddot{x}_j(t - \tau) d\tau + C_{ij} x_j \right] + G_i(x_i) = F_i(t) \quad (3.3.9)$$

$x_i, \dot{x}_i, \ddot{x}_i$: 節点変位、速度、加速度、 m_{ij} : 質量、 $\mu_{ij}(\infty)$: 周波数無限大時の付加質量係数、 B_{ij} : 線形減衰係数、 C_{ij} : 剛性係数 (浮体復元力+上部工+線形係留系)、 $G_i(x_i)$: 非線形係留力 (非線形バネ)、 $F_i(t)$: 強制外力、 $L_{ij}(\tau), L'_{ij}(\tau)$: メモリー影響関数、 N : 総自由度数である。

ここで、メモリー影響関数 $L_{ij}(\tau), L'_{ij}(\tau)$ は造波減衰 $\lambda_{ij}(\omega)$ をフーリエ逆変換することで求められる。

$$L_{ij}(\tau) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \cos \omega \tau \lambda_{ij}(\omega) d\omega \quad (3.3.10)$$

$$L'_{ij}(\tau) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \sin \omega \tau \frac{\lambda_{ij}(\omega)}{\omega} d\omega \quad (3.3.11)$$

このように2種類の運動方程式が存在するが、「3.4 時刻歴応答解析手法の解析的検証」の結果から、本研究では式(3.3.8)の運動方程式を用いることとした。なお、 $\mu_{ij}(\infty)$ は式(3.3.12)から得られる。

$$\mu_{ij}(\omega) - \mu_{ij}(\infty) = -\frac{2}{\pi} \int_0^\infty \lambda_{ij}(\omega') \frac{d\omega'}{\omega^2 - \omega'^2} \quad (3.3.12)$$

式(3.3.12)において、ある特定の周波数 $\omega = \omega_1$ に対して $\mu_{ij}(\infty)$ を計算するが、 ω_1 の広い範囲に対して $\mu_{ij}(\infty)$ は一定値が得られることがわかっている⁴⁾ので、 ω_1 の値にはほとんど影響しない。

3.3.3 モード法

時刻歴応答シミュレーションに際し、本研究ではモード法を用いる。モード法は、構造系の固有値解析から得られる固有モードの重ね合わせとして構造系の応答を表現し、各モードの応答振幅を未知量とする解法である。対応する固有値の小さい方から $M (<< N)$ 個のモードに対してのみ計算するので自由度が減少し、それに伴い解析に要する計算時間が大きく短縮されるという利点がある。しかし、計算に使用するモード数が不十分だと正しい応答が得られない場合があるので注意が必要である⁵⁾。

式(3.3.8)の運動方程式をマトリクス表示すると、式(3.3.13)のようになる。

$$[m + \mu(\infty)]\{\ddot{x}\} + [B]\{\dot{x}\} + [C]\{x\} = -\{G(x)\} + \{F(t)\} - \int_0^t [L(\tau)]\{\dot{x}(t-\tau)\}d\tau \quad (3.3.13)$$

非線形係留の項、及びメモリー効果の項を右辺に移項したのは、これ以降、それらの力を解析上、外力として扱っていくためである。

各モードの固有ベクトルを列方向に並べて得られるマトリクスを $[\phi]$ (モーダル・マトリクス)、モード応答振幅を $\{\zeta\}$ とすると、 $\{x\} = [\phi]\{\zeta\}$ と表せる。同様に $\{\dot{x}\} = [\phi]\{\dot{\zeta}\}$, $\{\ddot{x}\} = [\phi]\{\ddot{\zeta}\}$ となり、これらを式(3.3.13)に代入すると、式(3.3.14)のようになる。

$$\begin{aligned} [m + \mu(\infty)][\phi]\{\ddot{\zeta}\} + [B][\phi]\{\dot{\zeta}\} + [C][\phi]\{\zeta\} \\ = -\{G(x)\} + \{F(t)\} - \int_0^t [L(\tau)][\phi]\{\dot{\zeta}(t-\tau)\}d\tau \end{aligned} \quad (3.3.14)$$

さらに両辺の各項に左から $[\phi]^T$ をかけると、式(3.3.15)のようになる。

$$\begin{aligned} [\phi]^T [m + \mu(\infty)][\phi]\{\ddot{\zeta}\} + [\phi]^T [B][\phi]\{\dot{\zeta}\} + [\phi]^T [C][\phi]\{\zeta\} \\ = -[\phi]^T \{G(x)\} + [\phi]^T \{F(t)\} - \int_0^t [\phi]^T [L(\tau)][\phi]\{\dot{\zeta}(t-\tau)\}d\tau \end{aligned} \quad (3.3.15)$$

ここで単位マトリクスを $[I]$ とし、

$$[\phi]^T [m + \mu(\infty)][\phi] = [I] \quad (3.3.16)$$

と正規化すると、式(3.3.17)が得られる。

$$[\phi]^T [C][\phi] = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \omega_M^2 \end{bmatrix} \quad (3.3.17)$$

よって、式(3.3.15)は式(3.3.18)のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} \{\ddot{\zeta}\} + [\phi]^T [B][\phi]\{\dot{\zeta}\} + [\omega^2]\{\zeta\} \\ = -[\phi]^T \{G(x)\} + [\phi]^T \{F(t)\} - \int_0^t [\phi]^T [L(\tau)][\phi]\{\dot{\zeta}(t-\tau)\}d\tau \end{aligned} \quad (3.3.18)$$

固有値および固有ベクトルは、MK型の固有値問題である式(3.3.19)を解くことで得られる。

$$-\omega_r^2 [m + \mu(\infty)]\{\phi_r\} + [C]\{\phi_r\} = \{0\} \quad (3.3.19)$$

これは様々な汎用有限要素法コードを用いて解くことができる。ここで、式(3.3.18)の右辺を式(3.3.20)のように置き換える。

$$-[\phi]^T \{G(x)\} + [\phi]^T \{F(t)\} - \int_0^t [\phi]^T [L(\tau)] [\phi] \{\dot{\zeta}(t-\tau)\} d\tau = \{H(t)\} \quad (3.3.20)$$

また、 $[\phi]^T [B] [\phi]$ が式(3.3.21)のように対角マトリクスの形をとると仮定する。

$$\begin{aligned} [\phi]^T [B] [\phi] = & \begin{matrix} 2h\omega_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 2h\omega_M \end{matrix} \end{aligned} \quad (3.3.21)$$

以上から、式(3.3.18)は式(3.3.22)のようになり、モード毎の別個の方程式系として表現することができる。

$$\begin{aligned} \ddot{\zeta}_1 + 2h\omega_1 \dot{\zeta}_1 + \omega_1^2 \zeta_1 &= H_1(t) \\ \vdots \\ \ddot{\zeta}_M + 2h\omega_M \dot{\zeta}_M + \omega_M^2 \zeta_M &= H_M(t) \end{aligned} \quad (3.3.22)$$

式(3.3.21)は、マトリクス $[B]$ が式(3.3.23)で表される場合には必ず成り立つ。

$$[B] = \alpha[m + \mu(\infty)] + \beta[C] \quad (\alpha, \beta \text{ は実定数}) \quad (3.3.23)$$

3.3.4 NEWMARK- β 法

Newmark- β 法は、振動をシミュレーションするのに用いる線形加速度法をより一般化したものであり、 $\dot{x}(t+\Delta t)$, $x(t+\Delta t)$ を式(3.3.24)および式(3.3.25)で計算する。

$$\dot{x}(t+\Delta t) = \dot{x}(t) + (\Delta t/2) \{\ddot{x}(t) + \ddot{x}(t+\Delta t)\} \quad (3.3.24)$$

$$x(t+\Delta t) = x(t) + \frac{\Delta t}{1!} \dot{x}(t) + \frac{(\Delta t)^2}{2!} \ddot{x}(t) + \beta(\Delta t)^3 \frac{\ddot{x}(t+\Delta t) - \ddot{x}(t)}{\Delta t} \quad (3.3.25)$$

モード座標系において考えると、 $\dot{\zeta}(t+\Delta t)$, $\zeta(t+\Delta t)$ は、それぞれ式(3.3.26)および式(3.3.27)のようになる。

$$\dot{\zeta}(t+\Delta t) = \dot{\zeta}(t) + (\Delta t/2) \{\ddot{\zeta}(t) + \ddot{\zeta}(t+\Delta t)\} \quad (3.3.26)$$

$$\zeta(t+\Delta t) = \zeta(t) + \frac{\Delta t}{1!} \dot{\zeta}(t) + \frac{(\Delta t)^2}{2!} \ddot{\zeta}(t) + \beta(\Delta t)^3 \frac{\ddot{\zeta}(t+\Delta t) - \ddot{\zeta}(t)}{\Delta t} \quad (3.3.27)$$

β は公式の性格を調整するためのパラメーターで、 $0 \leq \beta \leq 1/2$ の範囲の値を与える。本研究では平均加速度に相当する $\beta = 1/4$ を用いる。式(3.3.26)、(3.3.27)を用いて、時刻 $(t+\Delta t)$ において式(3.3.22)を解くと、式(3.3.28) となり、時刻 t から Δt 秒後のモード応答の振幅、速度、及び加速度をそれぞれ求めることができる。

$$\begin{aligned}
\ddot{\zeta}_1(t+\Delta t) &= \frac{H_1(t+\Delta t) - 2h\omega_1(\dot{\zeta}_1(t) + \frac{\Delta t}{2}\ddot{\zeta}_1(t)) - \omega_1^2\{\zeta_1(t) + \Delta t\dot{\zeta}_1(t) + (\frac{1}{2}-\beta)(\Delta t)^2\ddot{\zeta}_1(t)\}}{1+2h\omega_1 - \frac{\Delta t}{2} + \omega_1^2 - \beta(\Delta t)^2} \\
&\vdots \\
\ddot{\zeta}_M(t+\Delta t) &= \frac{H_M(t+\Delta t) - 2h\omega_M(\dot{\zeta}_M(t) + \frac{\Delta t}{2}\ddot{\zeta}_M(t)) - \omega_M^2\{\zeta_M(t) + \Delta t\dot{\zeta}_M(t) + (\frac{1}{2}-\beta)(\Delta t)^2\ddot{\zeta}_M(t)\}}{1+2h\omega_M - \frac{\Delta t}{2} + \omega_M^2 - \beta(\Delta t)^2}
\end{aligned} \tag{3.3.28}$$

3.3.5 NEWMARK- β 法におけるメモリー影響の項の処理方法

時刻 $(t+\Delta t)$ の時のメモリー効果の項である式(3.3.29)について考える。

$$\{D\} = \int_0^{+\Delta t} [L(\tau)] \{\dot{x}(t+\Delta t-\tau)\} d\tau \tag{3.3.29}$$

ある時間 $k\Delta t$ から $(k+1)\Delta t$ ($k=0,1,2,\dots$) までの区間の積分値を式(3.3.23)で表す。

$$\{D_k\} = \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} [L(\tau)] \{\dot{x}(t+\Delta t-\tau)\} d\tau \tag{3.3.30}$$

その区間内で L 及び $\dot{x}$ は時間に対して線形に変化していると仮定すると、式(3.3.31)のように表せる。

$$\begin{aligned}
\{D_k\} &= \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} \left[L(k\Delta t) + \frac{L((k+1)\Delta t) - L(k\Delta t)}{\Delta t} (\tau - k\Delta t) \right] \\
&\quad \left\{ \dot{x}(t+\Delta t - k\Delta t) + \frac{\dot{x}(t+\Delta t - (k+1)\Delta t) - \dot{x}(t+\Delta t - k\Delta t)}{\Delta t} (\tau - k\Delta t) \right\} d\tau
\end{aligned} \tag{3.3.31}$$

式(3.3.31)を計算すると、式(3.3.32)が得られる。

$$\begin{aligned}
\{D_k\} &= \Delta t \left\{ \left[\frac{1}{3} L((k+1)\Delta t) + \frac{1}{6} L(k\Delta t) \right] \{\dot{x}(t+\Delta t - (k+1)\Delta t)\} \right. \\
&\quad \left. + \left[\frac{1}{6} L((k+1)\Delta t) + \frac{1}{3} L(k\Delta t) \right] \{\dot{x}(t+\Delta t - k\Delta t)\} \right\}
\end{aligned} \tag{3.3.32}$$

式(3.3.32)は、このままでは $k=0$ において未知量である $\dot{x}(t+\Delta t)$ が存在している。そこでまず、 $k=0$ の時の式(3.3.32)に式(3.3.24)を代入して、式(3.3.33)の形に書き換える。

$$\{D_0\} = \Delta t \left[\frac{L(\Delta t) + L(0)}{2} \right] \{\dot{x}(t)\} + (\Delta t)^2 \left[\frac{1}{6} L(\Delta t) + \frac{1}{3} L(0) \right] \left\{ \frac{\ddot{x}(t) + \ddot{x}(t+\Delta t)}{2} \right\} \tag{3.3.33}$$

この時、式(3.3.29)は、 $t = N\Delta t$ (N は自然数) とすると、式(3.3.34)となる。

$$\begin{aligned}
\{D\} &= \sum_{k=0}^N \{D_k\} \\
&= \Delta t \left[\frac{L(\Delta t) + L(0)}{2} \right] \{\dot{x}(t)\} + (\Delta t)^2 \left[\frac{1}{6} L(\Delta t) + \frac{1}{3} L(0) \right] \left\{ \frac{\ddot{x}(t) + \ddot{x}(t + \Delta t)}{2} \right\} \\
&\quad + \Delta t \sum_{k=1}^N \left\{ \left[\frac{1}{3} L((k+1)\Delta t) + \frac{1}{6} L(k\Delta t) \right] \{\dot{x}(t + \Delta t - (k+1)\Delta t)\} \right. \\
&\quad \left. + \left[\frac{1}{6} L((k+1)\Delta t) + \frac{1}{3} L(k\Delta t) \right] \{\dot{x}(t + \Delta t - k\Delta t)\} \right\} \quad (3.3.34)
\end{aligned}$$

ここで、上式の $\ddot{x}(t + \Delta t)$ の項を運動方程式(3.3.13)において左辺に移項すると式(3.3.35)のようになる。

$$\begin{aligned}
&\left[m + \mu(\infty) + \frac{(\Delta t)^2}{2} \left(\frac{1}{6} L(\Delta t) + \frac{1}{3} L(0) \right) \right] \{\ddot{x}(t + \Delta t)\} + [B] \{\dot{x}(t + \Delta t)\} + [C] \{x(t + \Delta t)\} \\
&= -\{G(x)\} + \{F(t + \Delta t)\} \\
&\quad - \left(\Delta t \left[\frac{L(\Delta t) + L(0)}{2} \right] \{\dot{x}(t)\} + (\Delta t)^2 \left[\frac{1}{6} L(\Delta t) + \frac{1}{3} L(0) \right] \left\{ \frac{\ddot{x}(t)}{2} \right\} \right. \\
&\quad \left. + \Delta t \sum_{k=1}^N \left\{ \left[\frac{1}{3} L((k+1)\Delta t) + \frac{1}{6} L(k\Delta t) \right] \{\dot{x}(t + \Delta t - (k+1)\Delta t)\} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \left[\frac{1}{6} L((k+1)\Delta t) + \frac{1}{3} L(k\Delta t) \right] \{\dot{x}(t + \Delta t - k\Delta t)\} \right\} \right) \quad (3.3.35)
\end{aligned}$$

ここで式(3.3.35)と式(3.3.24)、式(3.3.25)を連立して解けば最も精度の良い解を得られるが、式(3.3.35)に対して前述したようなモード法を適用した場合、左辺は式(3.3.36)となる。

$$\begin{aligned}
&[\phi]^T [m + \mu(\infty) \mathbf{I}] [\phi] \{\ddot{\zeta}(t + \Delta t)\} + [\phi]^T \left[\frac{(\Delta t)^2}{2} \left(\frac{1}{6} L(\Delta t) + \frac{1}{3} L(0) \right) \right] [\phi] \{\ddot{\zeta}(t + \Delta t)\} \\
&\quad + [\phi]^T [B] [\phi] \{\dot{\zeta}(t + \Delta t)\} + [\phi]^T [C] [\phi] \{\zeta(t + \Delta t)\} \quad (3.3.36)
\end{aligned}$$

これは、モード間の連成項が運動方程式の左辺において入ってしまうので、モード毎に独立した運動方程式を解くことができなくなる。そこで、式(3.3.37)のように近似する。

$$\left[\frac{(\Delta t)^2}{2} \left(\frac{1}{6} L(\Delta t) + \frac{1}{3} L(0) \right) \right] \{\ddot{x}(t + \Delta t)\} \approx \left[\frac{(\Delta t)^2}{2} \left(\frac{1}{6} L(\Delta t) + \frac{1}{3} L(0) \right) \right] \{\ddot{x}(t)\} \quad (3.3.37)$$

その結果、メモリー影響の項を時刻 t までの応答量のみに依存する外力として扱えるようになる（右辺で扱えるようになる）ため、前述のモード法をそのまま適用することが可能となる。

この近似による計算精度は、「3.4.1 時刻歴応答解析手法の解析的検証」で検証する。

3.3.6 メモリー影響関数の FFT による計算法

メモリー影響関数を求めるには、式(3.3.38)のフーリエの $\cos$ 逆変換を離散化する必要がある。

$$L(\tau) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \cos \omega \tau \lambda(\omega) d\omega \quad (3.3.38)$$

厳密には $\omega = \infty$ まで積分する必要があるが、造波減衰 $\lambda(\omega)$ はある十分大きな $\omega (= \omega_{\max})$ からゼロとして近似できるため、 $\omega_{\max}$ までの積分に置き換えることができる。したがって、式(3.3.39) とすることができる。

$$L(\tau) \approx \frac{2}{\pi} \int_0^{\omega_{\max}} \cos \omega \tau \lambda(\omega) d\omega \quad (3.3.39)$$

造波減衰を $\omega = 0$ から $\omega = \omega_{\max}$ まで ω に関して等間隔に全 N 点で計算する時、その計算点は式(3.3.40) のように表せる。

$$\omega_n = (n-1)\Delta\omega = \omega_{\max} \frac{n-1}{N-1} \quad (n=1,2,\dots,N) \quad (3.3.40)$$

ここで、 $\tau = (m-1)\Delta t$ (ただし、 $m=1,2,\dots$) として台形積分を行うと、式(3.3.41) となる。

$$L((m-1)\Delta t) = \frac{2}{\pi} \left[\sum_{n=2}^{N-1} \left\{ \cos \left[\frac{\omega_{\max} (n-1)(m-1)}{N-1} \Delta t \right] \lambda \left(\frac{\omega_{\max} (n-1)}{N-1} \right) \right\} + \frac{1}{2} \lambda(0) + \frac{1}{2} (-1)^{m-1} \lambda(\omega_{\max}) \right] \Delta\omega \quad (3.3.41)$$

さらに、 $\Delta t = \pi / \omega_{\max}$ とすると、式(3.3.41) は式(3.3.42) のように書き換えられる。

$$L((m-1)\Delta t) = \frac{2}{\pi} \left[\sum_{n=2}^{N-1} \left\{ \cos \left[\frac{(n-1)(m-1)\pi}{N-1} \right] \lambda \left(\frac{\omega_{\max} (n-1)}{N-1} \right) \right\} + \frac{1}{2} \lambda(0) + \frac{1}{2} (-1)^{m-1} \lambda(\omega_{\max}) \right] \Delta\omega \quad (3.3.42)$$

以上の変形によって、フーリエの $\cos$ 逆変換に FFT アルゴリズムを用いることができるようになり、メモリー影響関数の計算を高速に行うことが可能となる。

3.4 時刻歴応答解析手法の解析的検証

3.4.1 簡易モデルによる検証

本項では、簡易なモデル（円筒浮体構造）の Heave 運動を取り上げ、本研究で開発した時刻歴応答解析手法の検証を行う。検証は、周波数応答解析の応答と比較することで行う。

(1) 条件

本章での解析モデルは図-3.4.1-1 に示す、半径 $a=1.0$ 、喫水 $D=0.5$ の円筒浮体とし、水深 $h=10.0$ であるとする。解析は全て無次元で行い、表記も全て無次元量で行う。有次元量については $\sim$ をつけてそれと示す。長さについては半径 $\tilde{a}$ で無次元化することとする。また、加速度は重力加速度 $\tilde{g}$ で、密度は流体の密度 $\tilde{\rho}$ で無次元化する。これら3つを基本量として、*Froude* 相似則に基づき各無次元量を決定する。例えば時間について考えると、基本量と時間の次元は表-3.4.1 のようになる。

表-3.4.1 各量の次元行列

	長さ	加速度	密度	時間
M (質量次元)	0	0	1	0
L (長さ次元)	1	1	-3	0
T (時間次元)	0	-2	0	1

よって、時間の有次元量に $\sqrt{(\text{加速度})/(\text{長さ})}$ をかけてやれば、時間の無次元量が定義される。つまり、ここでは $\sqrt{\tilde{g}/\tilde{a}}$ をかけてやればよい。他の無次元量も同様にして求まる。各無次元量の定義を表-3.4.2 に示す。

表-3.4.2 無次元量の定義（有次元量には $\sim$ を付す）

無次元化時間	$t = \tilde{t} \sqrt{\frac{\tilde{g}}{\tilde{a}}}$	無次元化速度	$\dot{x} = \frac{\tilde{\dot{x}}}{\tilde{a}} \sqrt{\frac{\tilde{a}}{\tilde{g}}}, \quad \dot{\zeta} = \frac{\tilde{\dot{\zeta}}}{\tilde{a}} \sqrt{\frac{\tilde{a}}{\tilde{g}}}$
無次元化周波数	$\omega = \tilde{\omega} \sqrt{\frac{\tilde{a}}{\tilde{g}}}$	無次元化加速度	$\ddot{x} = \frac{\tilde{\ddot{x}}}{\tilde{g}}, \quad \ddot{\zeta} = \frac{\tilde{\ddot{\zeta}}}{\tilde{g}}$
無次元化力	$F = \frac{\tilde{F}}{\tilde{\rho} \tilde{g} \tilde{a}^3}$	無次元化付加質量	$\mu = \frac{\tilde{\mu}}{\tilde{\rho} \tilde{a}^3}$
無次元化質量	$m = \frac{\tilde{m}}{\tilde{\rho} \tilde{a}^3}$	無次元化造波減衰	$\lambda = \frac{\tilde{\lambda}}{\tilde{\rho} \tilde{a}^3} \sqrt{\frac{\tilde{a}}{\tilde{g}}}$
無次元化静的復元力	$C_{33} = \frac{\tilde{C}_{33}}{\tilde{\rho} \tilde{g} \tilde{a}^3}$	無次元化された メモリ一影響関数	$L = \frac{\tilde{L}}{\tilde{\rho} \tilde{a}^3} \sqrt{\frac{\tilde{a}}{\tilde{g}}}$
無次元化変位	$x = \frac{\tilde{x}}{\tilde{a}}, \quad \zeta = \frac{\tilde{\zeta}}{\tilde{a}}$	無次元化された単位 振幅波高あたり波力	$X = \frac{\tilde{X}}{\tilde{\rho} \tilde{g} \tilde{a}^2}$

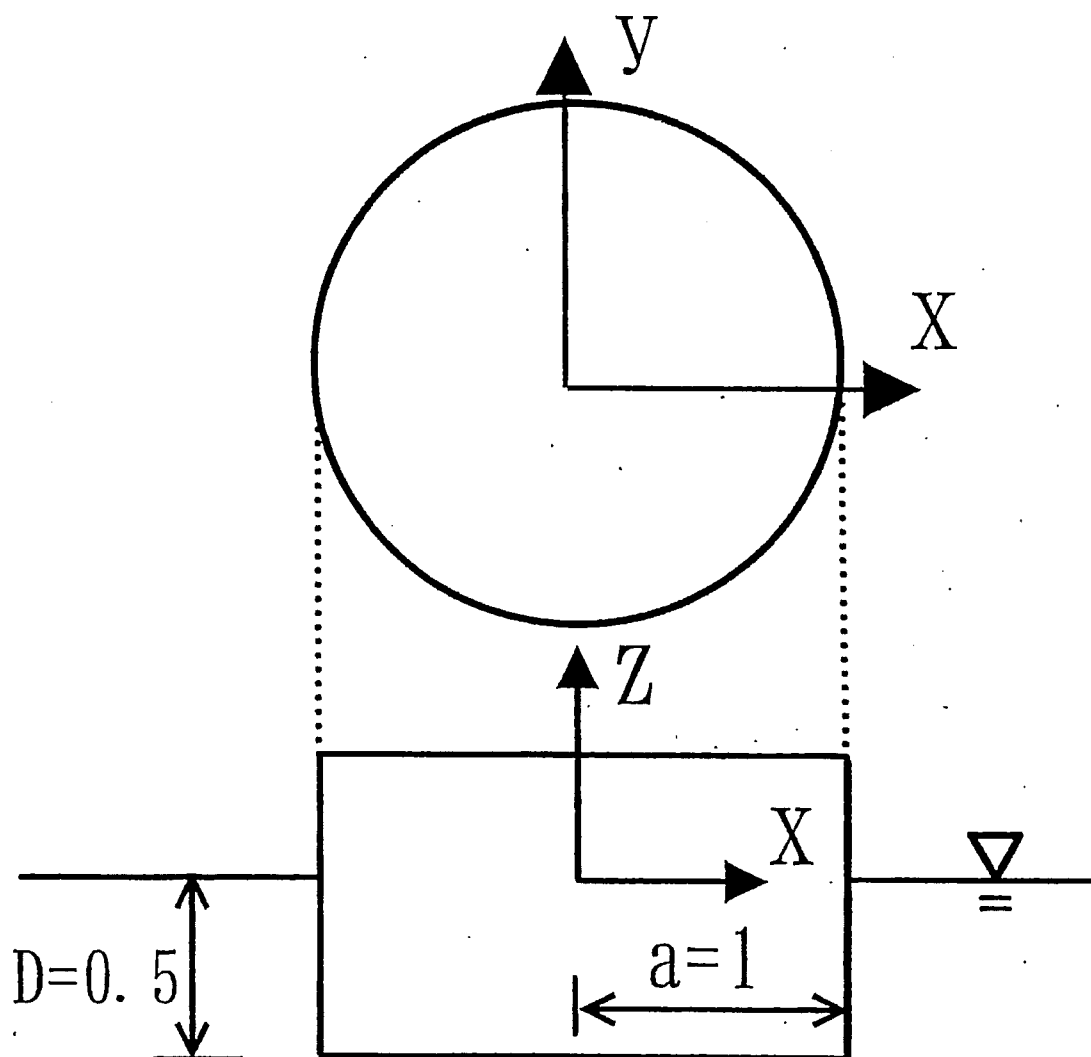


図-3.4.1-1 解析モデル

(2) 時刻歴応答解析

時刻歴応答解析に先立ち、流体力係数であるメモリー影響関数 $L(t)$ 及び $L'(t)$ 、周波数無限大時の付加質量係数 $\mu(\infty)$ をそれぞれ、式(3.3.10)、(3.3.11)、(3.3.12)に基づいて算出する。その結果を、図-3.4.1-2～図-3.4.1-7 に示した。

算出した流体力係数を用いて、規則波として正弦波による強制波力を与えた際の時刻歴応答解析を行った。

(3) 検証および結果

1) 周波数無限大時の付加質量係数の検証

式(3.3.12)により周波数無限大時の付加質量係数 $\mu_{33}(\infty)$ を算出し、 $1/\omega \sim \mu_{33}(\omega)$ グラフを利用し検証を行った。その結果を図-3.4.1-3 に示している。なお、 $\mu_{33}(\omega)$ の添字は自由度方向を表し、33 は鉛直方向を意味する。 $\mu_{33}(\omega)$ の値は $1/\omega \rightarrow 0$ で求めた $\mu(\infty)$ の値に近づいていることから、正しい $\mu_{33}(\infty)$ の値を計算することができたと考えられる。

2) 2種のメモリー影響関数の比較検証

図-3.4.1-6 に式(3.3.10)から求めたメモリー影響関数 $L(t)$ 、図-3.4.1-7 に式(3.3.11)から求めたメモリー影響関数 $L'(t)$ を示した。 $dt = \pi / \omega_{\max}$ となるため、 $4.0 < \omega < 25.6$ において造波減衰をゼロとして扱い、 $\omega_{\max} = 25.6$ としてメモリー影響関数を滑らかな曲線で得た。

両者の結果を比べると、 $L'(t)$ が $L(t)$ と比べて収束性に劣っていることが確認できる。運動方程式(3.3.8)、(3.3.9)等から確認できるとおり、メモリー影響関数の収束が早いほどメモリー効果に関する項の計算量は少なくて済む。このことから、プログラムの計算速度では、 $\cos$ フーリエ逆変換を行う $L(t)$ を用いた運動方程式(3.3.8)の方が優れており、本研究では、時刻歴応答解析の運動方程式に式(3.3.8)を用いることとした。

3) メモリー効果の項の近似に関する比較検証

周波数応答解析から得られた応答と、式(3.3.37)の近似を行う前の運動方程式と近似を行った後の運動方程式を用いた時刻歴応答解析を $dt = \pi / 25.6$ で行い、それらの結果を比較した。なお、正弦波の周波数は $\omega_1 = 0.10, 0.50, 0.80, 0.90, 0.95, 1.00, 1.05, 1.10, 1.20, 1.50, 2.00$ の 12 通りとした。ただし、最初のステップ ($\approx 25(s)$) はエンベロープをかけ、強制波力が徐々に強くなるようにした。その結果を図-3.4.1-8 に示した。同図より、近似の有無にかかわらず周波数応答解析の結果にはほぼ一致している。解析結果の一例として、図-3.4.1-9 に $\omega_1 = 1.00$ の時の両者の時刻歴応答を示す。

注) 本検討は、1自由度系の解析であるため、連成項を考慮する必要がない。そのため、式(3.3.37)による近似を行わなくても運動方程式が解ける。

次に、 dt の間隔を大きくした場合に両者の計算精度について比較検討を行った。 dt は $\pi/25.6$, $2\pi/25.6$, $5\pi/25.6$ の 3 通り、正弦波の周波数は先程と同じ 12 通りとした。式(3.3.37)の近似を行わない場合と行った場合の結果を、図-3.4.1-10、図-3.4.1-11 にそれぞれ示した。両者を比較すると、周波数計算精度については $dt = 5\pi/25.6$ のとき正弦波の周波数により、両者の優劣は多少異なるが、総合的にはほぼ同じ結果が得られている。

以上から、メモリー効果の項の近似の方法として式(3.3.37)は妥当であるものと考ええる。

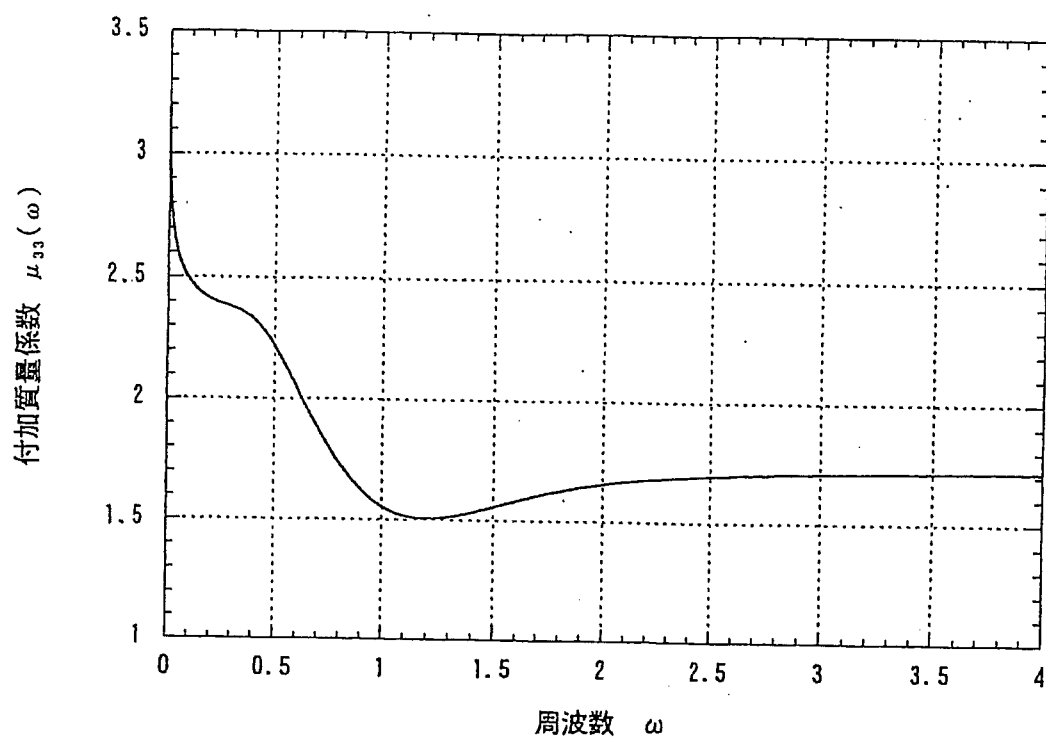


図-3.4.1-2 付加質量係数解析モデル $\mu_{33}(\omega)$

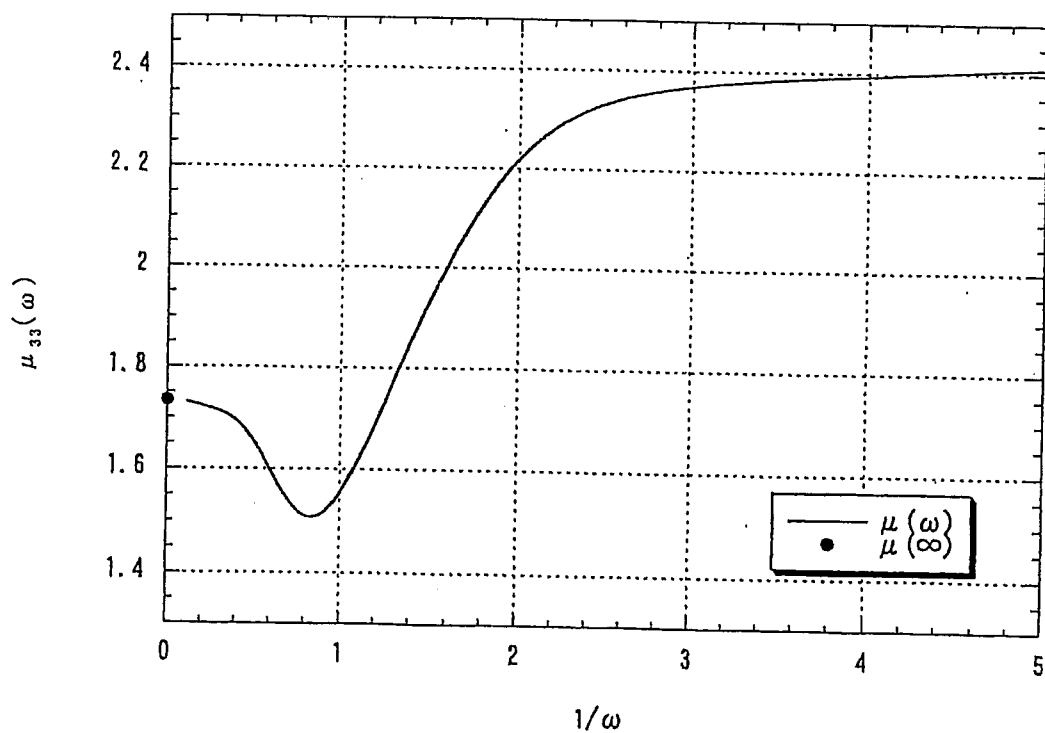


図-3.4.1-3 周波数無限大の付加質量係数 $\mu_{33}(\infty)$

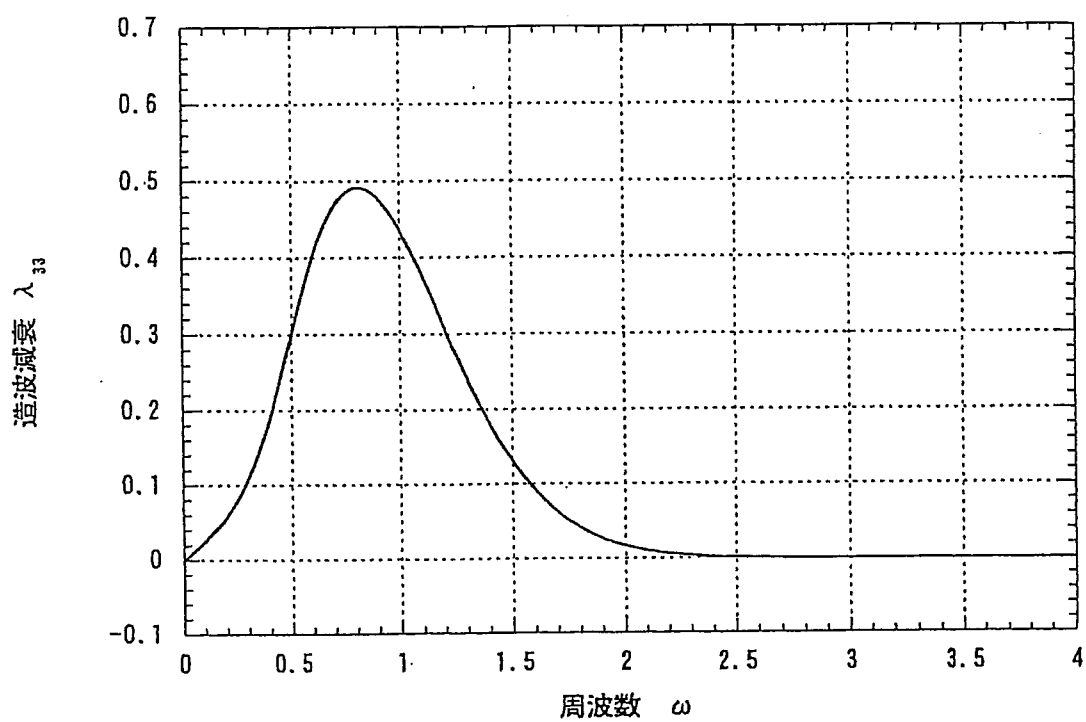


図-3.4.1-4 造波減衰 λ_{33}

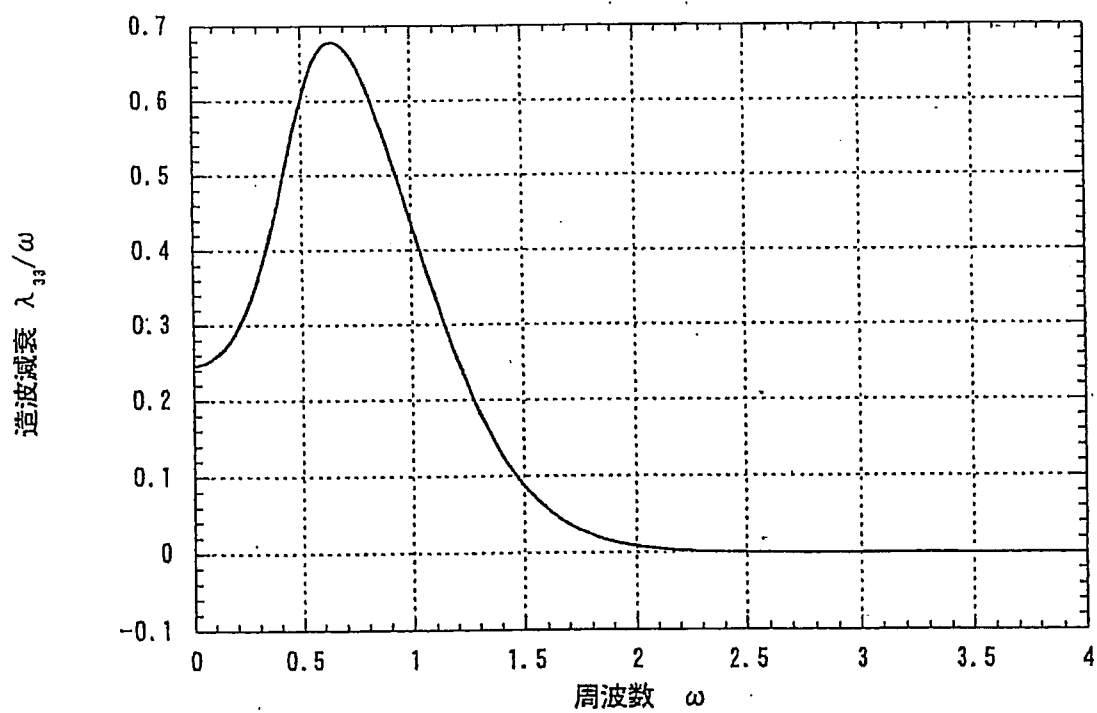


図-3.4.1-5 造波減衰 λ_{33}/ω

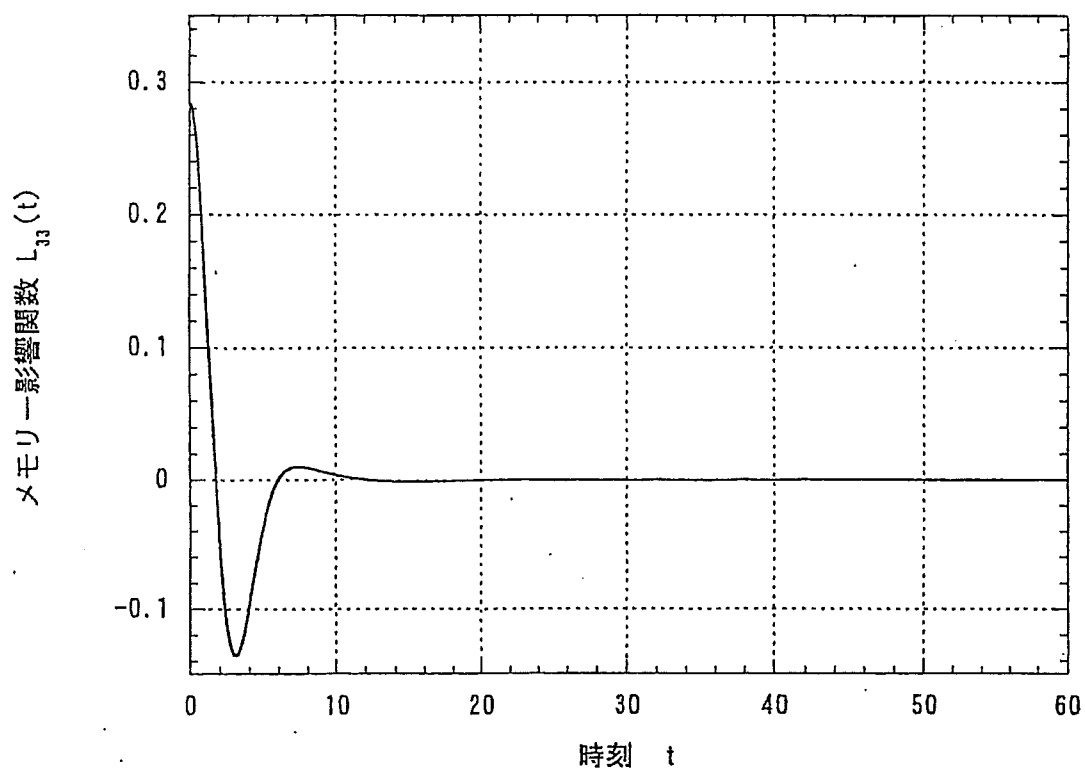


図-3.4.1-6 $\cos$ フーリエ逆変換を用いたメモリー影響関数 $L_{33}(t)$

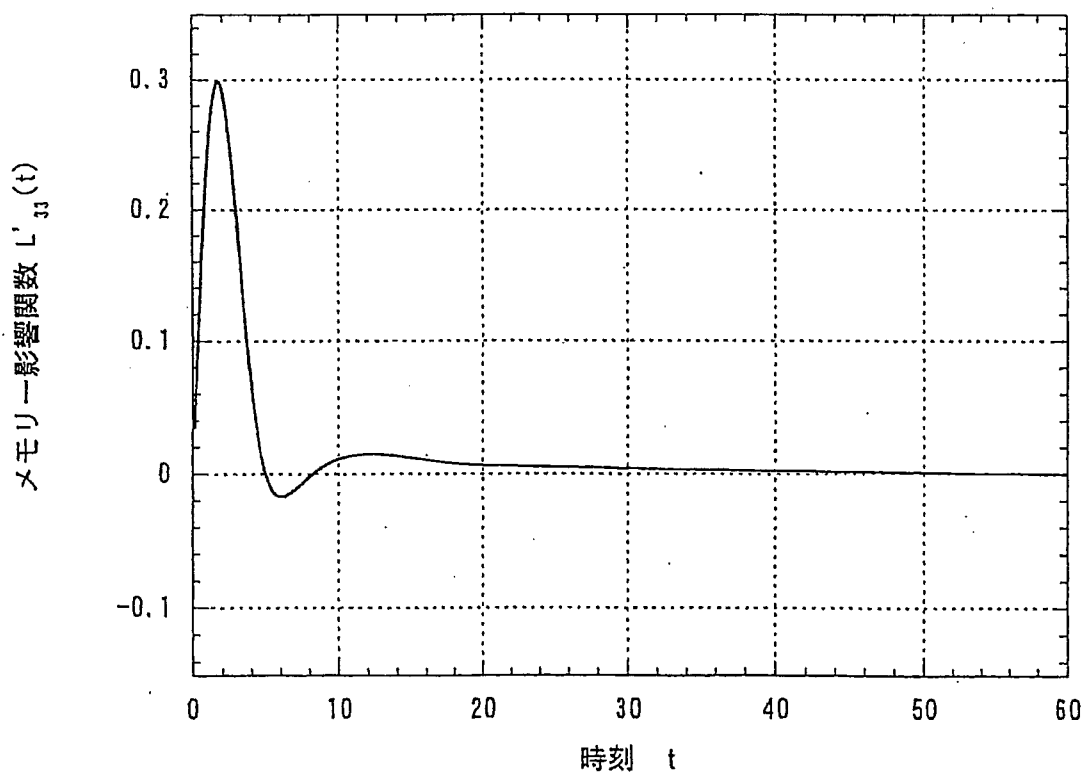


図-3.4.1-7 $\sin$ フーリエ逆変換を用いたメモリー影響関数 $L'_{33}(t)$

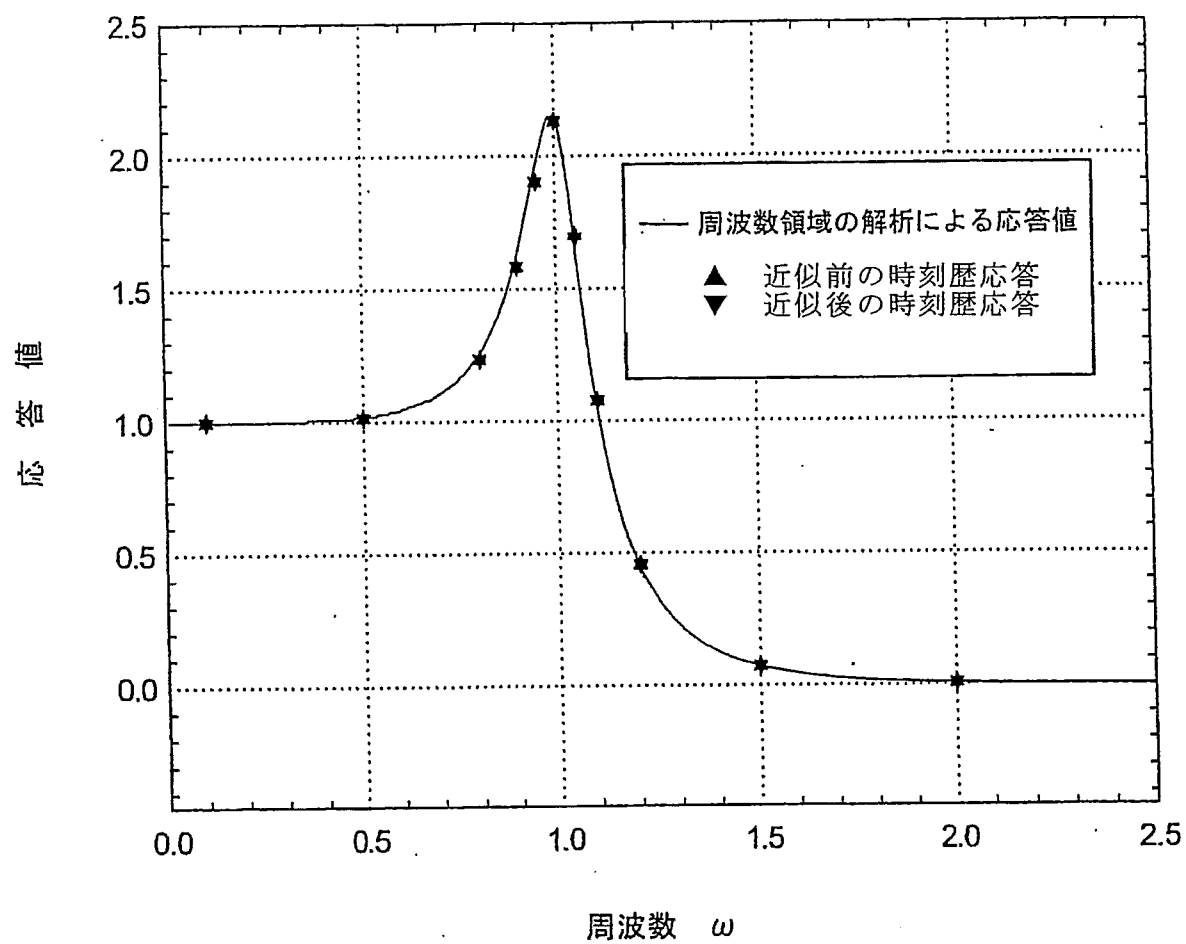


図-3.4.1-8 メモリー影響の項の近似前後での応答値の比較

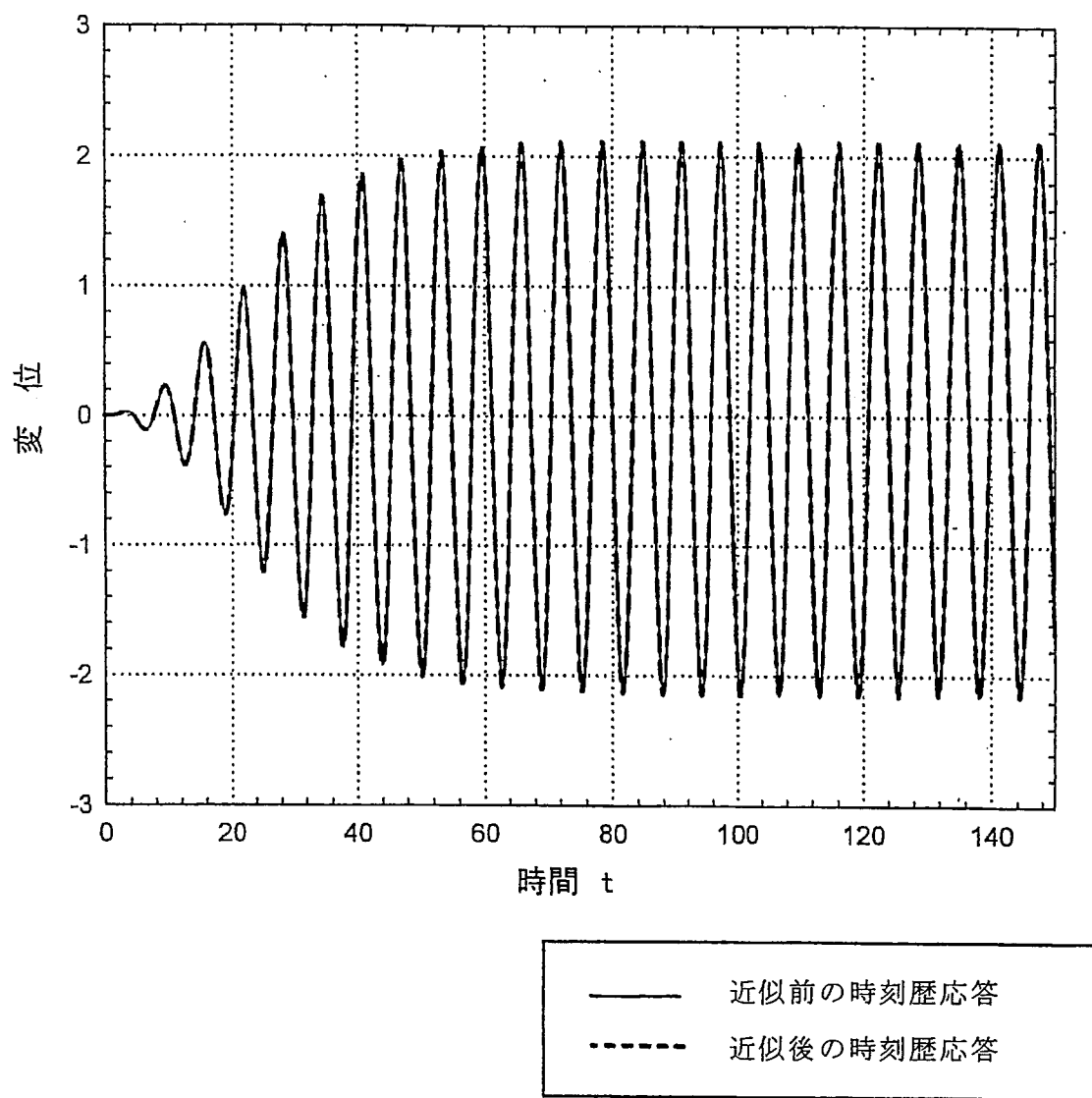


図-3.4.1-9 $\omega_1=1.00$ の時の近似有無による時刻歴応答解析結果の比較

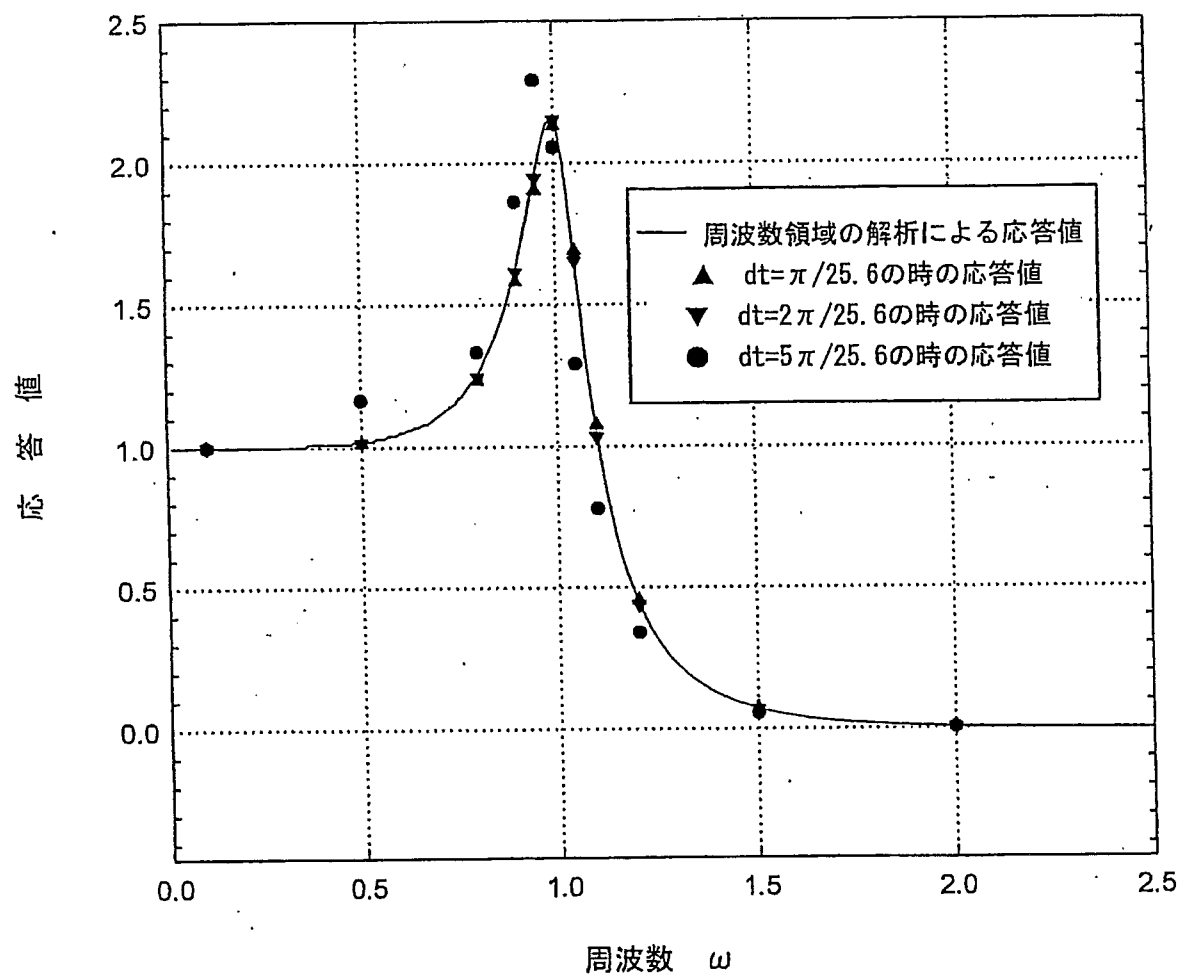
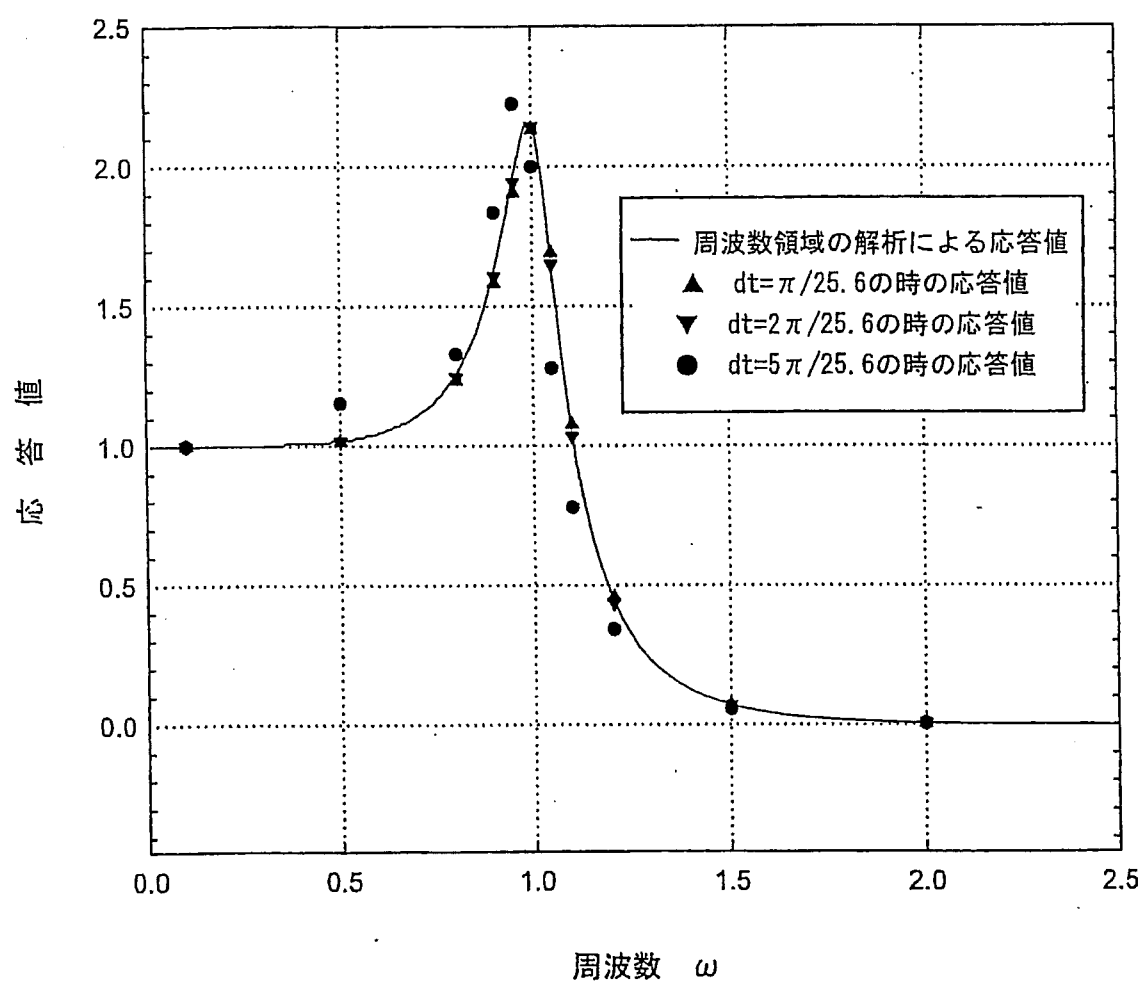


図-3.4.1-10 メモリー影響の項の近似を行わない場合の精度の変化



図一3.4.1-11 メモリー影響の項の近似を行った場合の精度の変化

3.4.2 浮体橋モデルによる検証

(1) 条件

本項では、浮体橋モデルにより、本研究で開発した時刻歴応答解析手法の検証を行う。検証は、周波数応答解析の応答と比較することで行う。浮体橋のモデルおよび水深は図-3.4.2-1、図-3.4.2-2 にそれぞれ示す。なお、係留系は線形バネとして考える。外力には、前項と同様に、始めの 200 ステップ間はエンベロープをかける。モデルの自由度は、次のように定める。

- ① 浮体基礎単体の座標では x 軸を浮体基礎の長軸方向に、 y 軸をその水平直角方向に、 z 軸を鉛直方向にとる。各々の軸方向の並進をそれぞれ自由度 1,2,3、軸回りの回転をそれぞれ自由度 4,5,6 とする。
- ② 浮体橋の全体座標では x 軸を橋軸と平行に、 y 軸を橋軸直角方向に、 z 軸を鉛直方向にとる。各々の軸方向の並進をそれぞれ自由度 1,2,3、軸回りの回転をそれぞれ自由度 4,5,6 とする。

(2) 流体力係数

流体力係数は、浮体基礎単体について解析を行い算出する。浮体基礎を 1 辺の最大長さが 1m となるようにメッシュ分割し、境界要素法による付加質量係数、造波減衰係数を算出する。算出された付加質量、造波減衰はそれぞれ図-3.4.2-3、図-3.4.2-4 にそれぞれ示した。

計算精度を確保するには入射波の 1/4 波長がメッシュパネルの 1 辺の最大長さより大きいという条件を満たしている必要があるので、入射波長 $> 4.0m (\omega \approx 3.92rad/s)$ までは信頼できるデータとなる。各算出間隔は $\Delta\omega = 0.05rad/s$ である。これを用いてメモリー影響関数 $L_{ij}(t)$ 、 $L'_{ij}(t)$ 、および周波数無限大時の付加質量係数 $\mu_{ij}(\infty)$ を算出し、図-3.4.2-5～図-3.4.2-7 にそれぞれ示した。計算時には、造波減衰において *Irregular Frequencies* が見られる部分では、前後の平均値を用いた。

(3) 運動方程式の選択

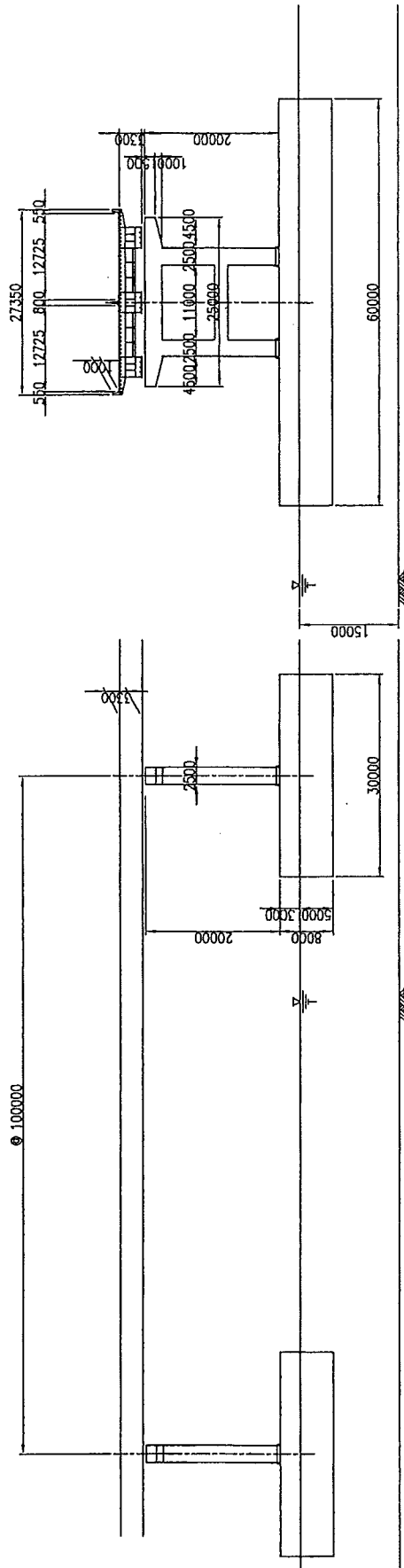
図-3.4.2-5 および図-3.4.2-6 のメモリー影響関数を比較すると、 $\sin$ フーリエ逆変換を用いたメモリー影響関数 $L'(t)$ は 33 成分において収束しているとは言い難い。それに対して、 $\cos$ フーリエ逆変換を用いたメモリー影響関数 $L(t)$ はどの成分も収束が早い。よってプログラムの計算速度を考慮し、本章においても運動方程式は $L(t)$ を用いた式 (3.3.10) を採用することとした。

なお、11、22、66 成分のメモリー影響関数で細かな揺れが見られるのは、造波減衰が算出可能な最大の ω において、十分小さくなっていないことが原因に考えられる。

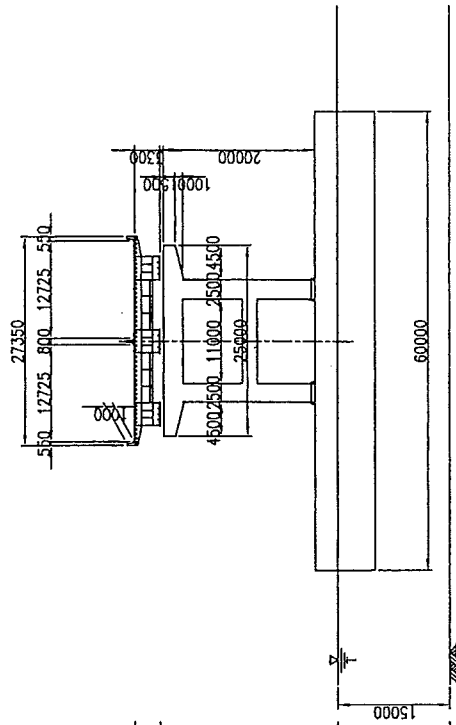
(4) 規則波

ここでは、強制波力として規則波を与えた場合について解析を行った。規則波は静水面において浮体基礎に力を及ぼすと考え。また、波の入射角は橋軸に対して直角方向、波高は 1.0m

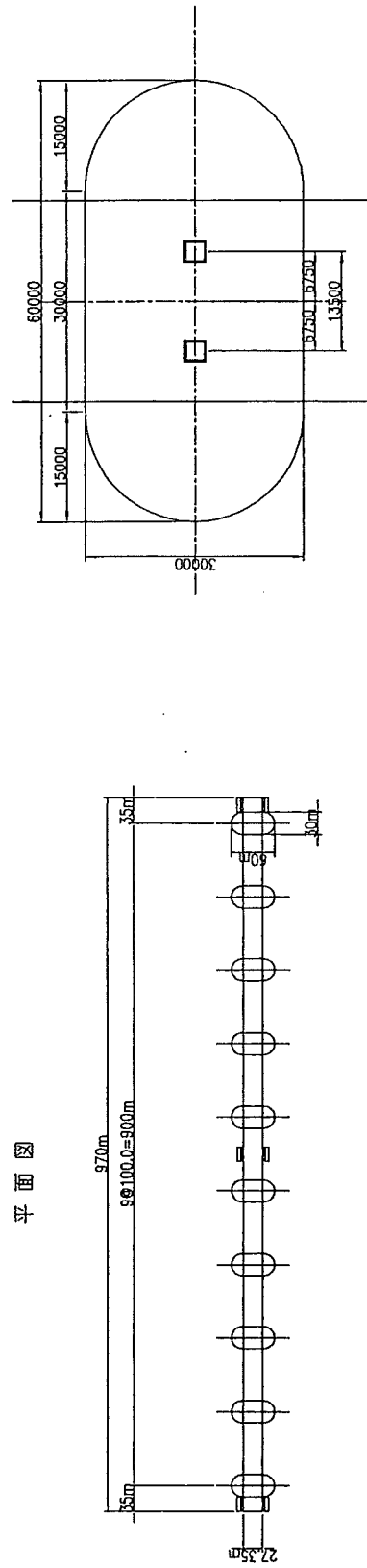
側面図



断面図



平面図



特記なき寸法値の単位は mm

図一3.4.2-1 解析対象の浮体橋

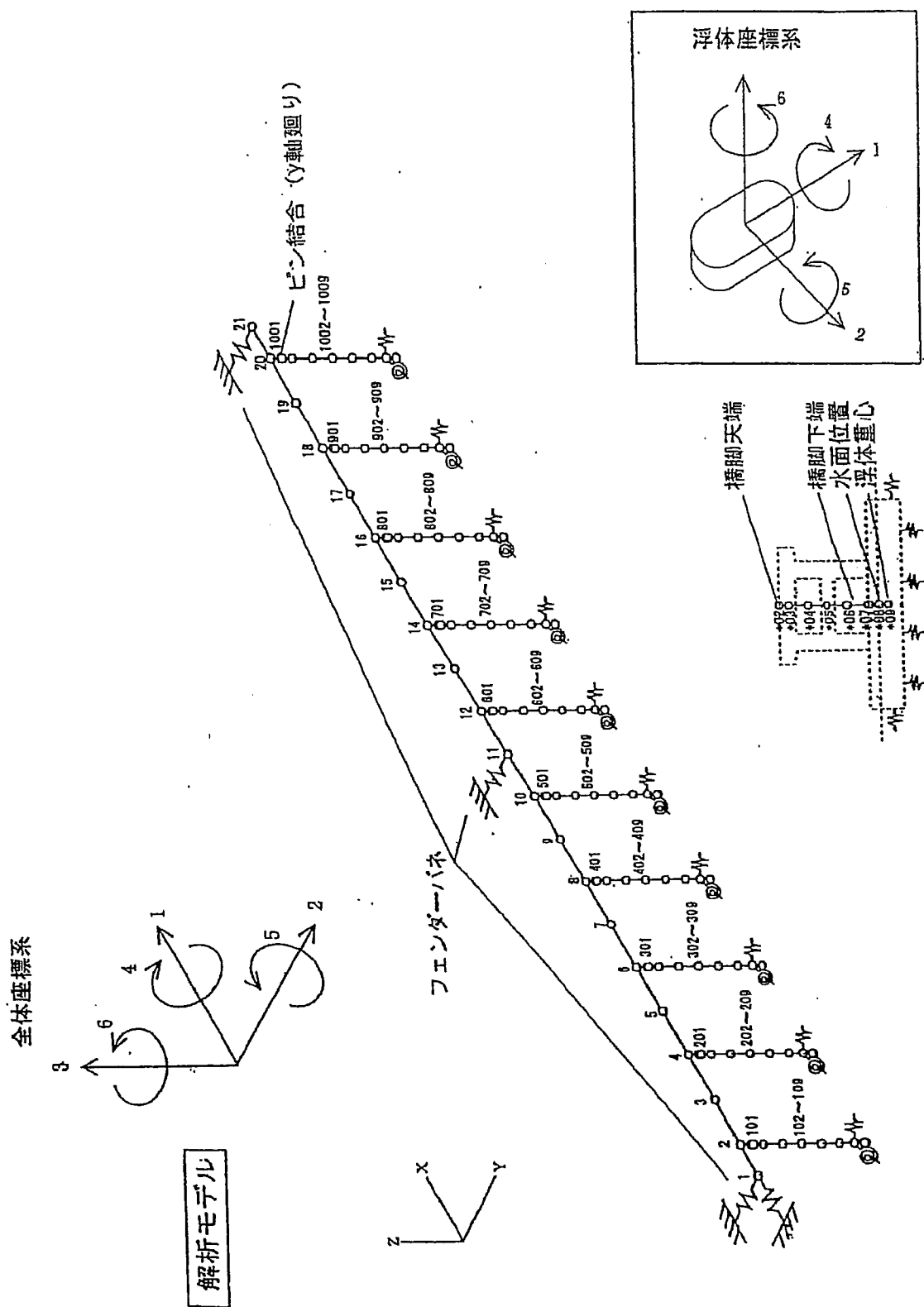


図-3.4.2-2 解析モデル

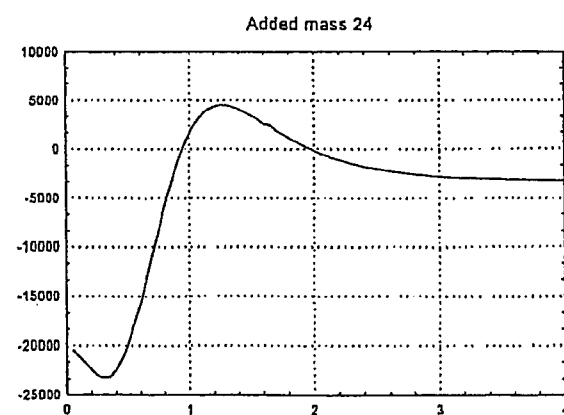
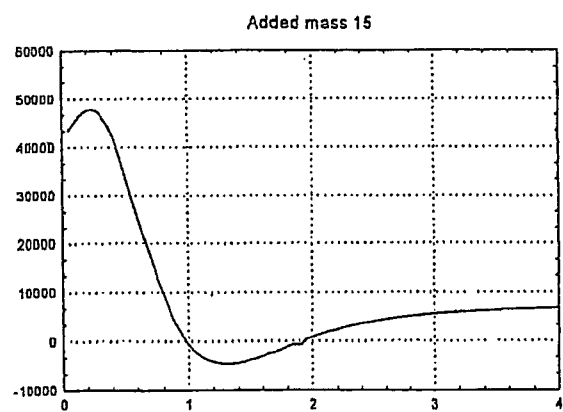
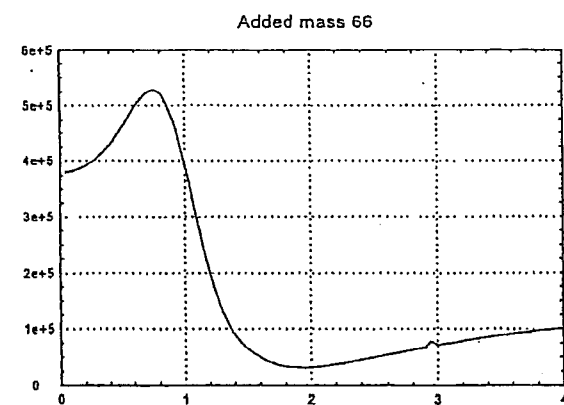
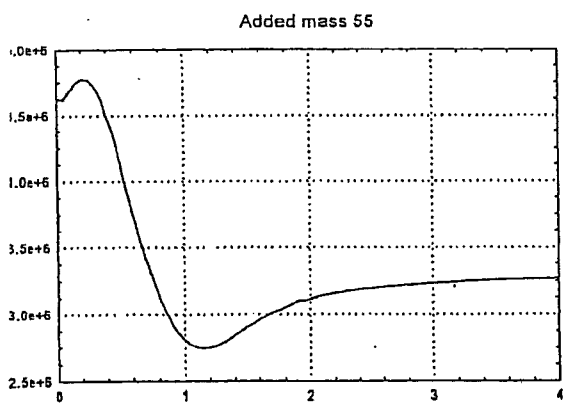
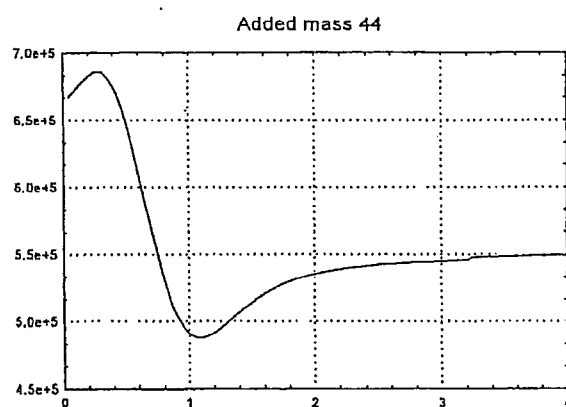
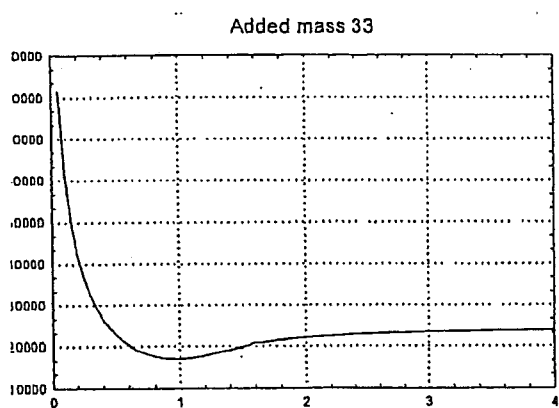
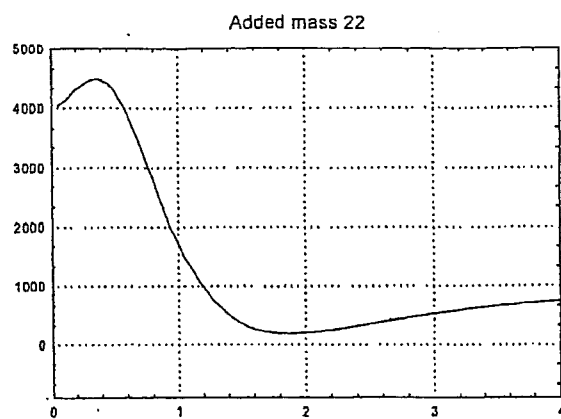
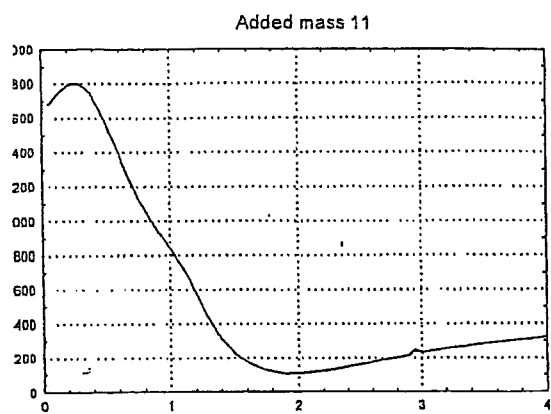


図-3.4.2-3 付加質量 μ_{ij} (縦軸: μ_{ij}/ρ 、横軸: ω)

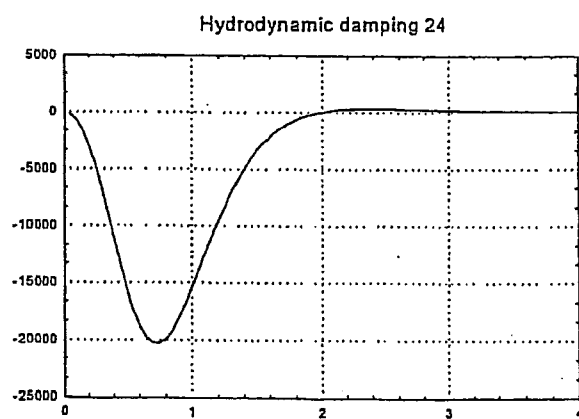
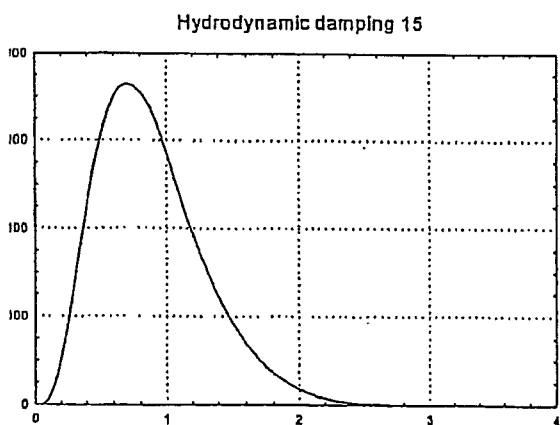
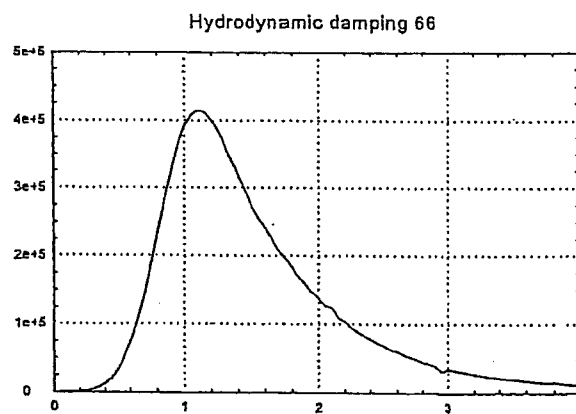
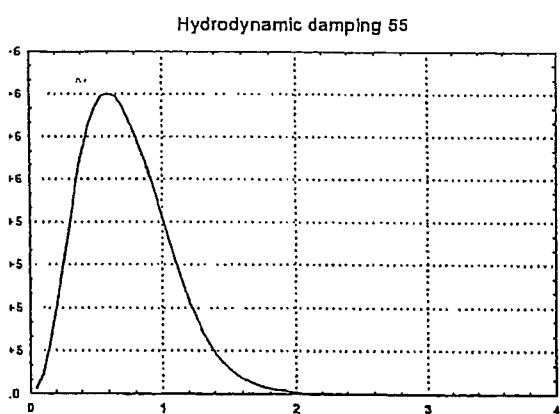
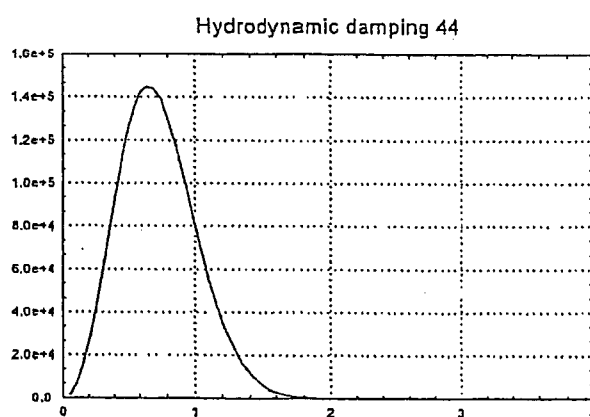
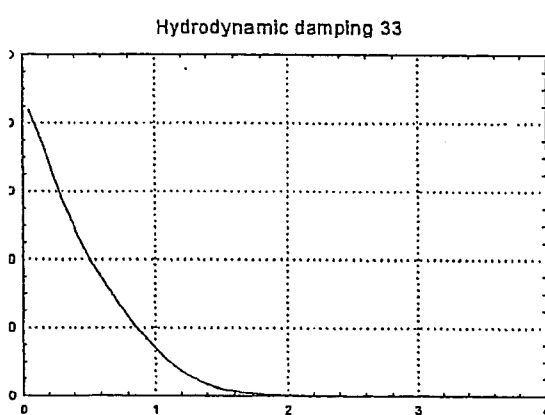
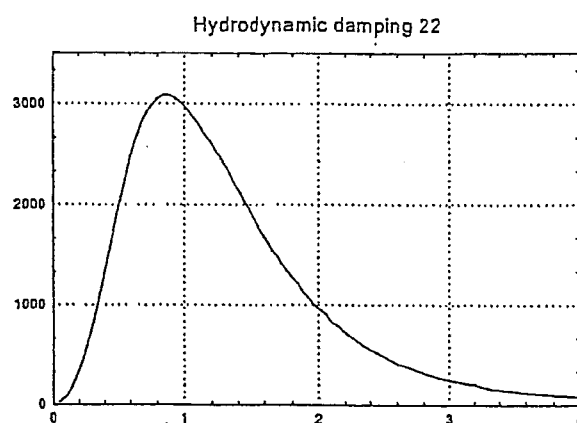
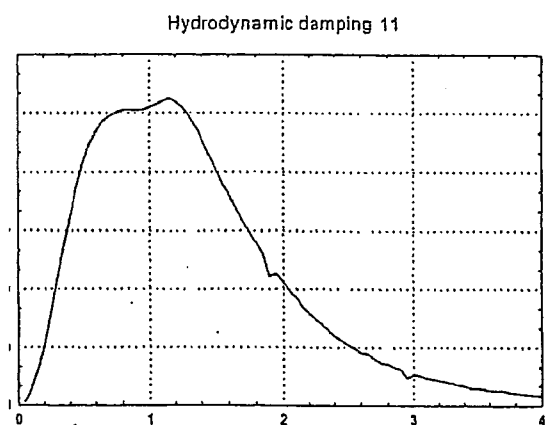


図-3.4.2-4 造波減衰 λ_{ij} (縦軸: $\lambda_{ij}/\rho\omega$ 、横軸: ω)

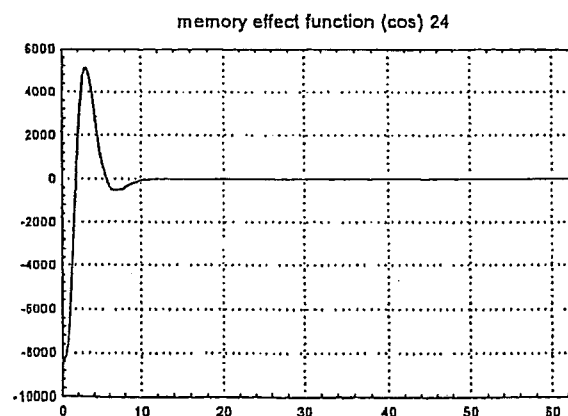
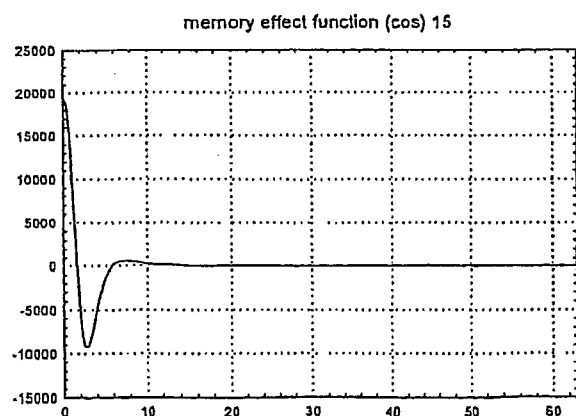
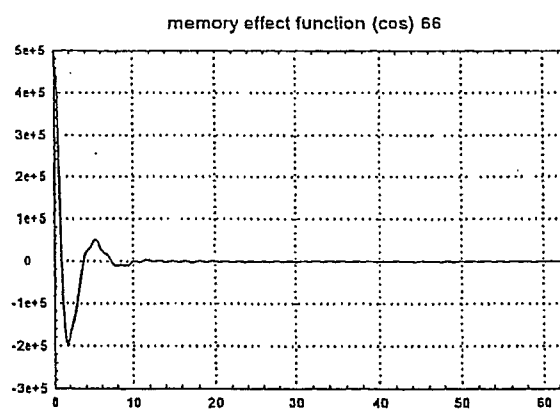
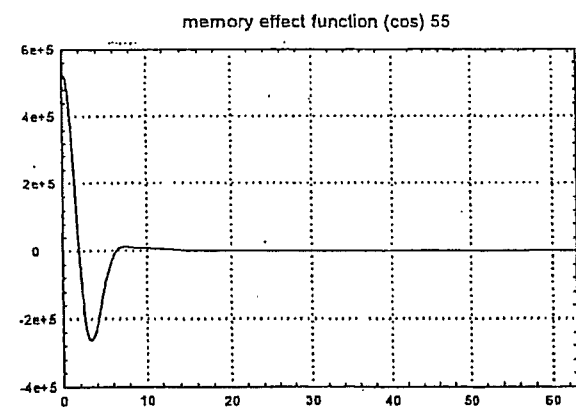
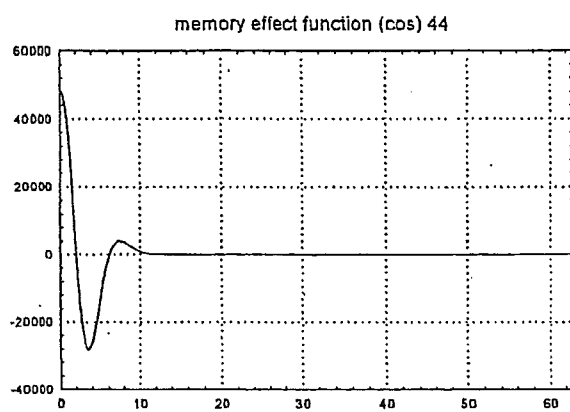
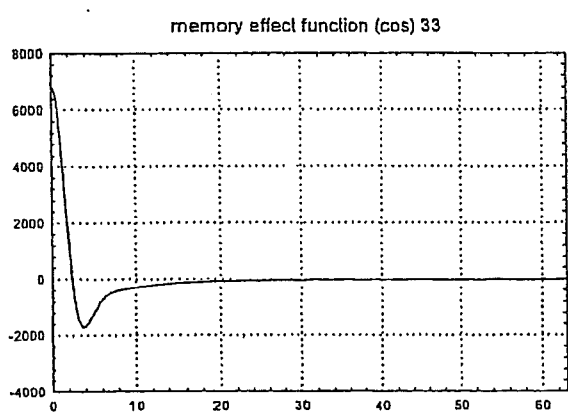
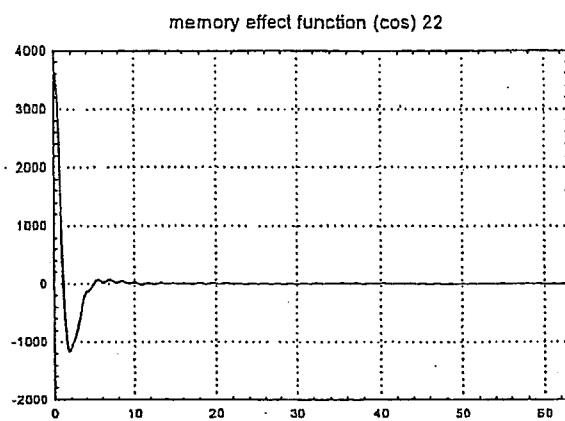
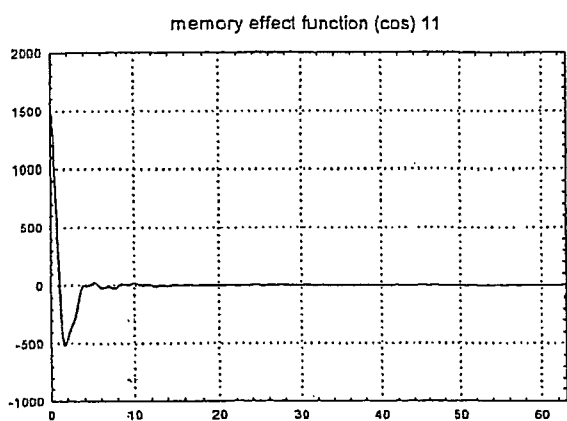


図-3.4.2-5 メモリー影響関数 L_{ij} (cos フーリエ逆変換) (縦軸: L_{ij}/ρ 、横軸: 時間 $t(s)$)

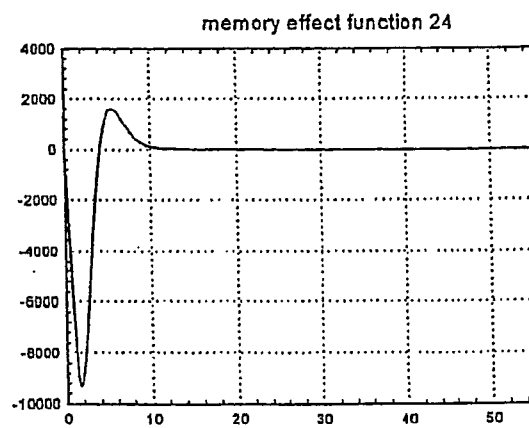
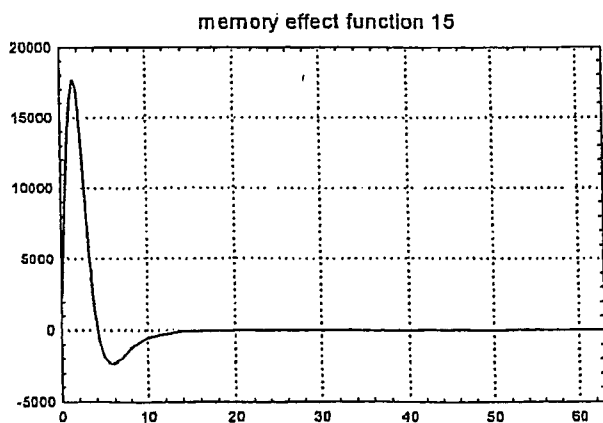
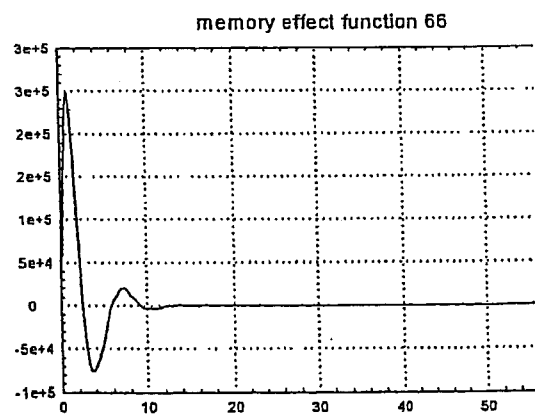
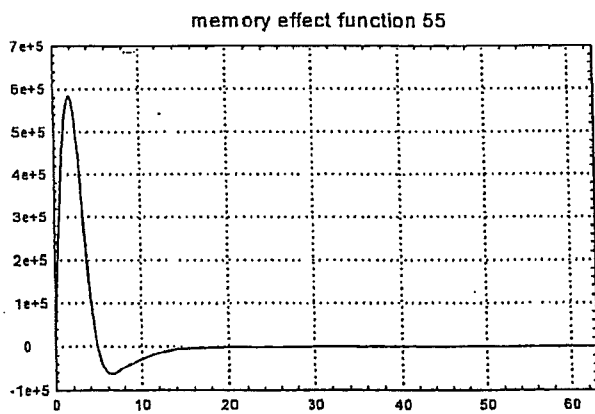
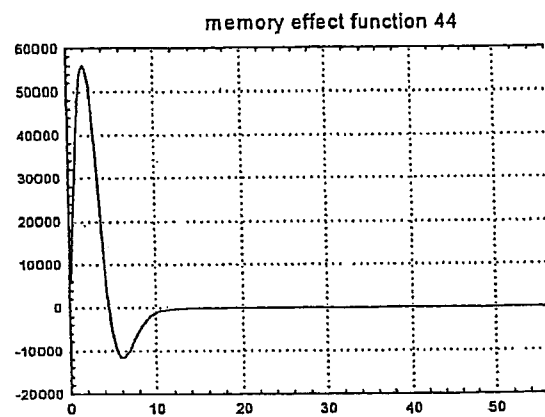
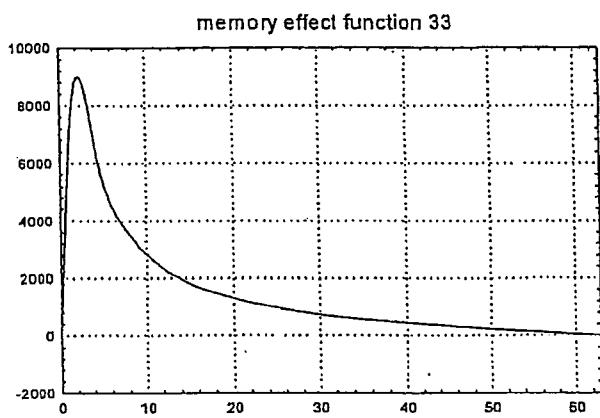
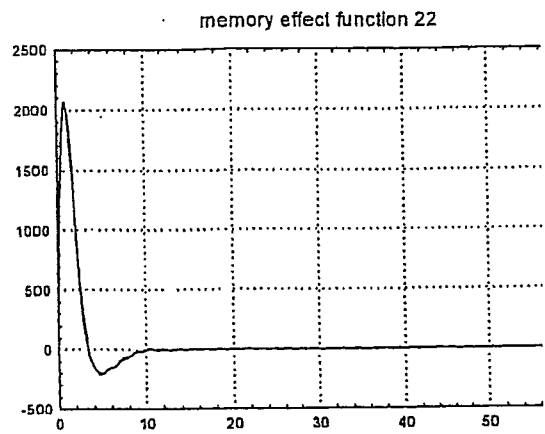
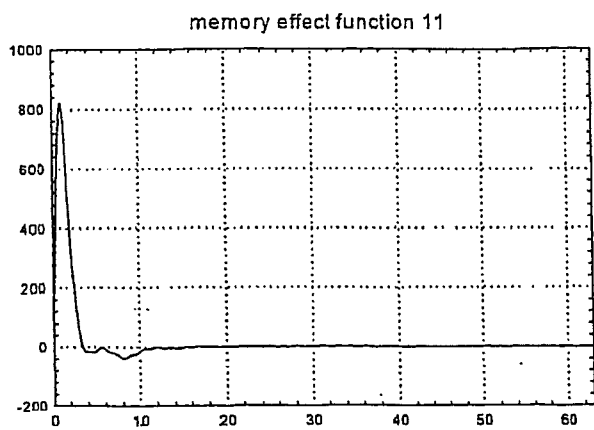


図-3.4.2-6 メモリー影響関数 L'_{ij} (sin フーリエ逆変換) (縦軸: L'_{ij}/ρ 、横軸: 時間 $t(s)$)

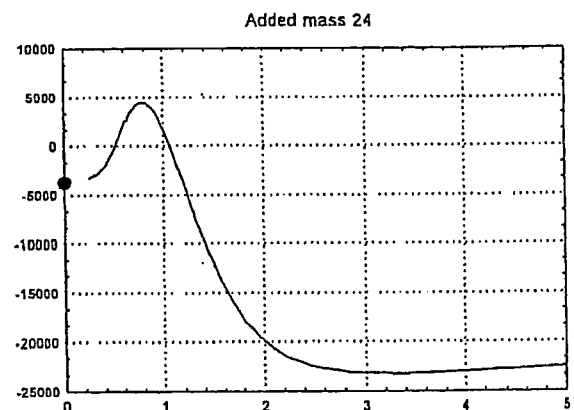
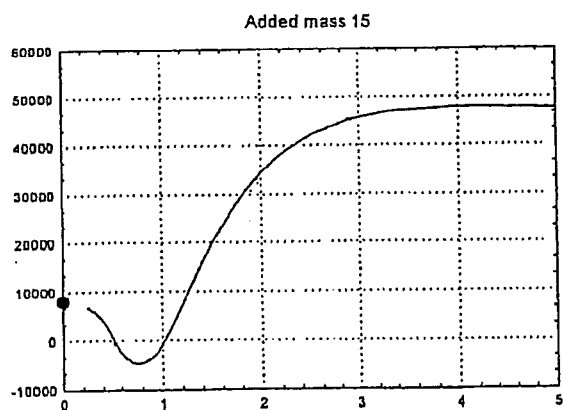
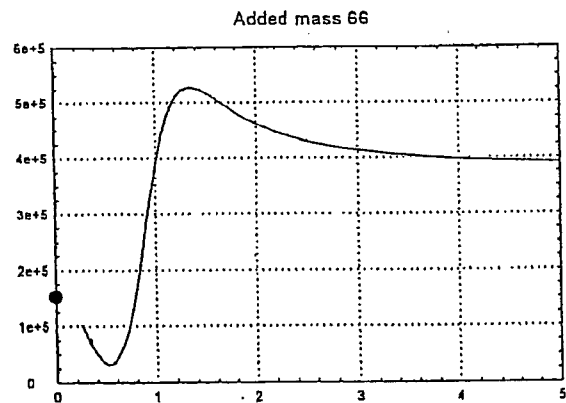
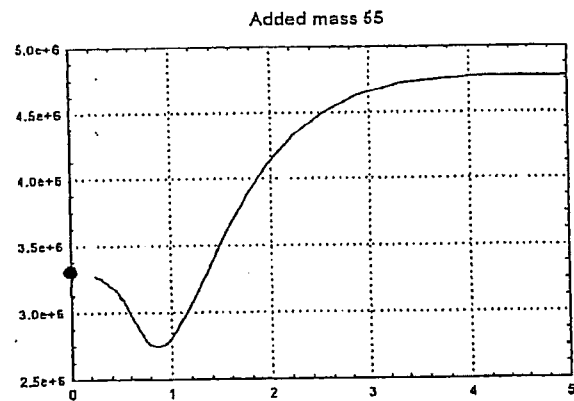
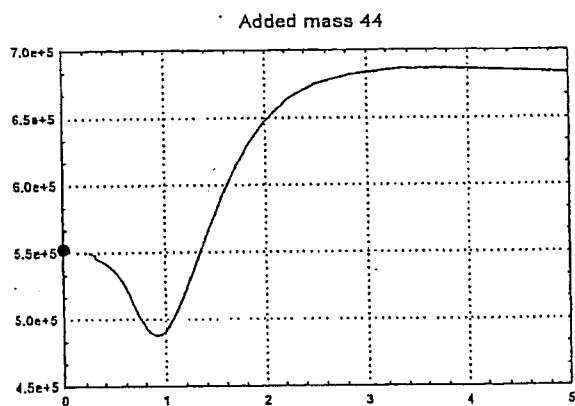
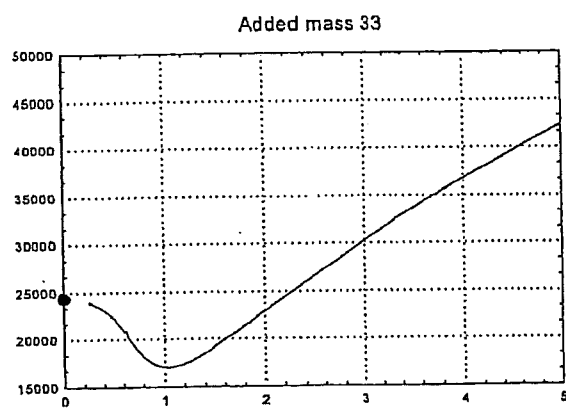
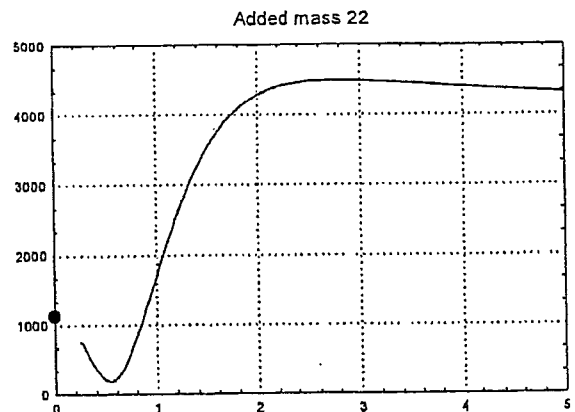
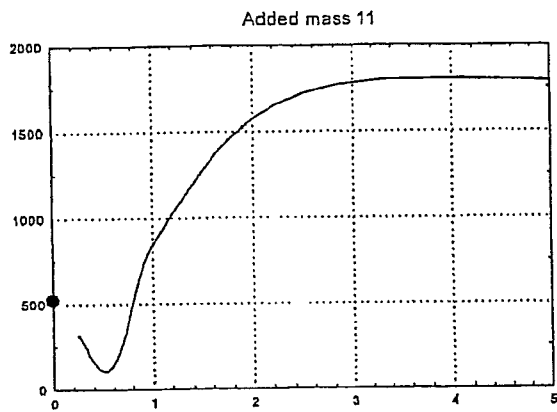


図-3.4.2-7 周波数無限大時の付加質量 $\mu_{ij}(\infty)$ (黒点) (縦軸: μ_{ij}/ρ 、横軸: $1/\omega$)

で、各浮体基礎に同位相で入射しているとする。

検証は、過剰応答が十分に減衰した後の時刻歴応答の振幅と周波数応答の振幅が一致することを利用して行った。正弦波の周波数は $f_1 = 0.020, 0.040, 0.060, 0.080, 0.100, 0.120, 0.140, 0.160, 0.180, 0.200, 0.240, 0.280, 0.320, 0.360$ (Hz) の 14 通りとした。ここで入射波周波数を円振動数 ω (rad/s) ではなく f (Hz) で与えているのは、解析に使用した汎用プログラム (NASTRAN) において周波数を f (Hz) で与えるので、これを統一して両者の振幅の比較を容易にするためである。

波は橋軸直角方向に入射するので、各節点の変位、速度、加速度については 2, 3, 4 自由度についてのみ考える。ここで、代表節点として 2,108,508 番の 3 節点を選び、各節点において 2, 3, 4 自由度での時刻歴応答の振幅を求め、周波数応答解析の結果と比較した。その結果を図-3.4.2-8～図-3.4.2-10 に示した。また、 $f = 0.10, 0.12, 0.14, 0.16$ (Hz) の時の節点番号 508 の時刻歴応答を図-3.4.2-11～図-3.4.2-14 に示した。

図-3.4.2-8～図-3.4.2-10 から、時刻歴応答の振幅と周波数応答の振幅はほぼ一致していることが確認できる。2, 4 自由度において $f = 0.12$ (Hz) 付近で応答が卓越しているが、これは与えられた規則波の周波数が浮体橋の固有周波数に非常に接近しており、共振が起こっているためだと考えられる。図-3.4.2-12, 図-3.4.2-13 から、実際に共振が起こっていることがわかる。さらに、 $f = 0.08$ (Hz) の時の全体系の応答振幅を図-3.4.2-15～図-3.4.2-17 に示した。時刻歴応答の振幅と周波数応答の振幅を比較すると、大きな値を持つ自由度番号 2, 3 においてほぼ一致していることが確認できる。自由度番号 4 においては両者に多少の誤差はあるものの、非常に小さな値であることから、問題は無いものと判断できる。

(5) 不規則波

不規則波力の発生には、不規則な変動外力は多数の周波数成分がランダムな位相で重なり合ったものである。そこで、波力のパワースペクトルから不規則変動の時系列を作成する方法を用いる。波力のパワースペクトルを N 個のストリップの和で近似し、次式のように N 個の規則波を重ね合わせて不規則波力の時系列をつくる。

$$F_i(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2S_i(\omega_k)} \Delta\omega_k \cos(\omega_k t + \delta_i(\omega_k) + \theta_k) \quad (3.4.1)$$

ここで、 $\omega_k = \frac{\omega_k + \omega_{k-1}}{2}$, $\Delta\omega_k = \omega_k - \omega_{k-1}$, $S_i(\omega)$: 波力のパワースペクトル、 $\delta_i(\omega_k)$: 各自由度における周波数依存の位相角、 $\theta_k : 0 < \theta_k < 2\pi$ の一様な乱数、である。 θ_k は各規則波成分の位相で、この位相の与え方によって同じスペクトルを持ちながら時系列の異なる不規則波力ができる。

波力のパワースペクトルは線形重ね合わせ法における出力スペクトルとして与えられる。入力スペクトルとして波のスペクトルを用い、周波数応答関数は単位振幅波高あたりの波力とする。この時、波力のパワースペクトルは次式で求められる。

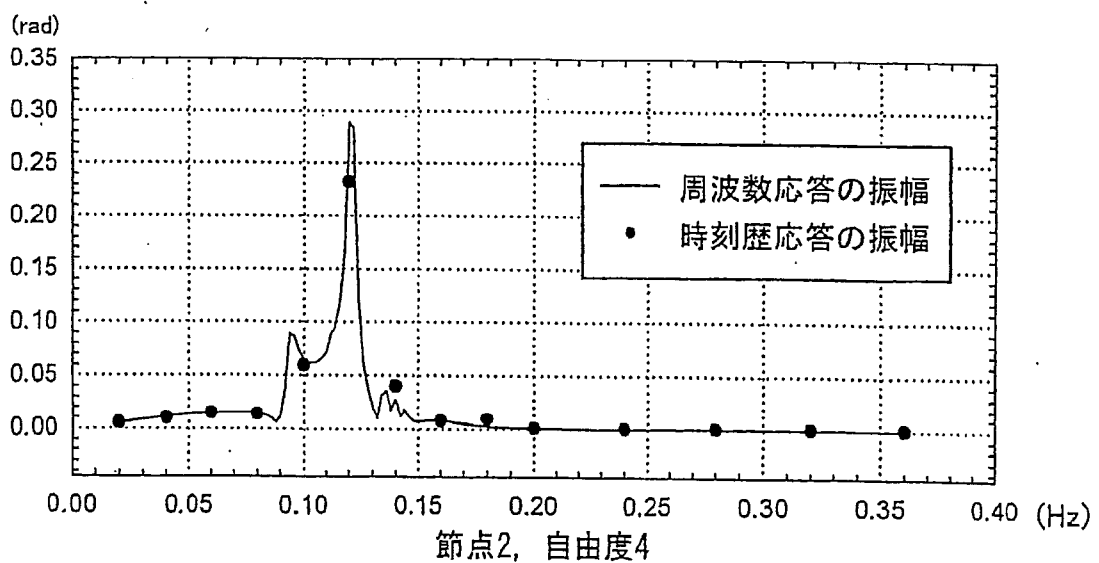
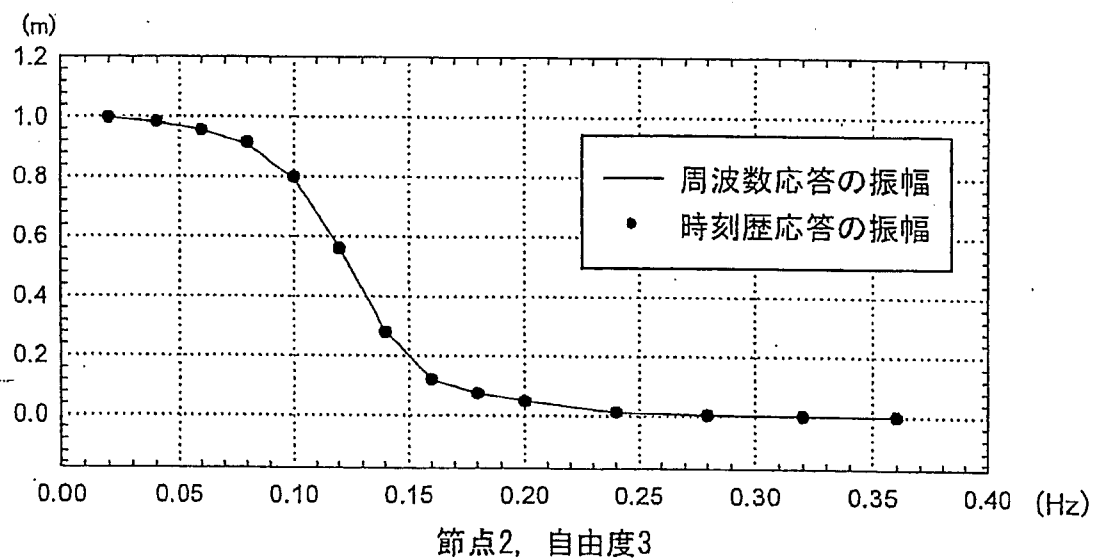
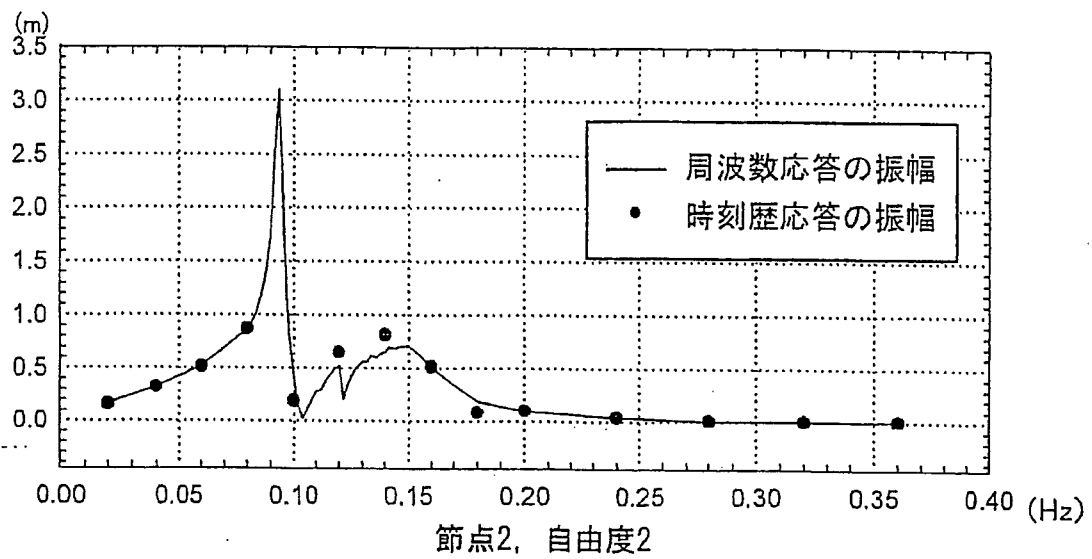


図-3.4.2-8 節点2における時刻歴応答の振幅と周波数応答の振幅の比較
(縦軸：振幅、横軸：入射波の周波数)

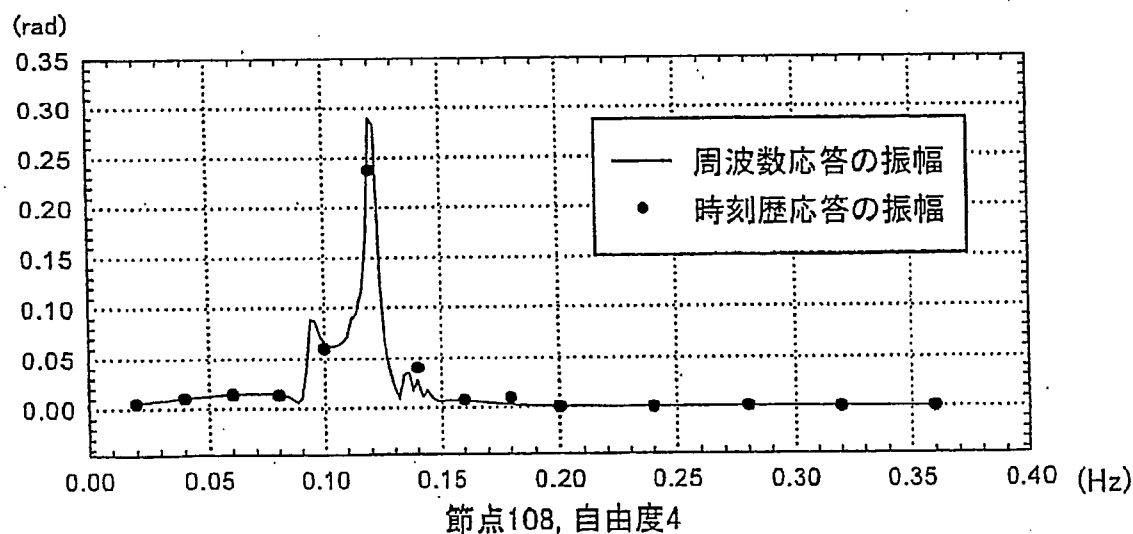
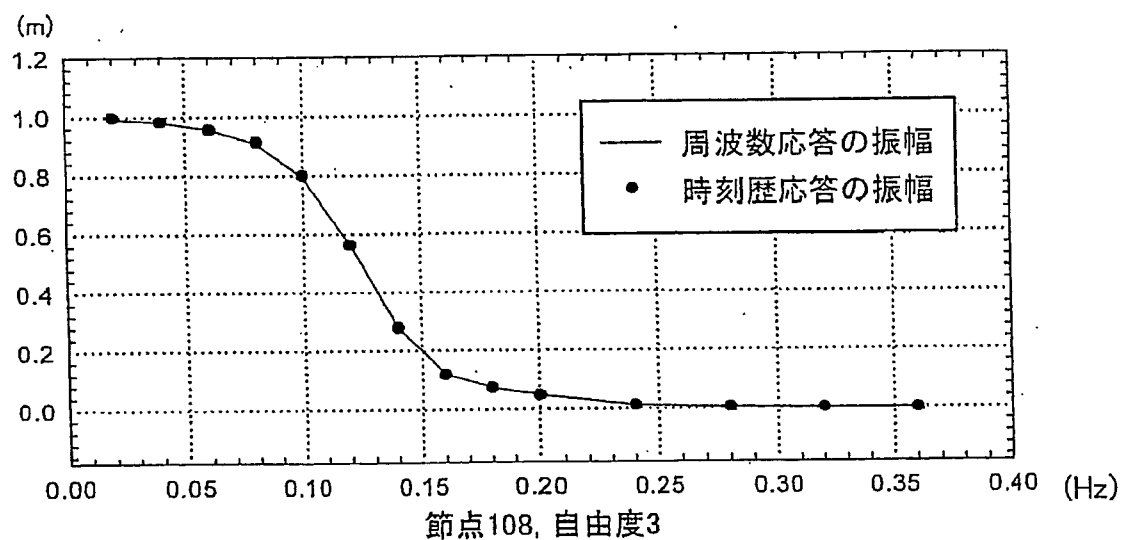
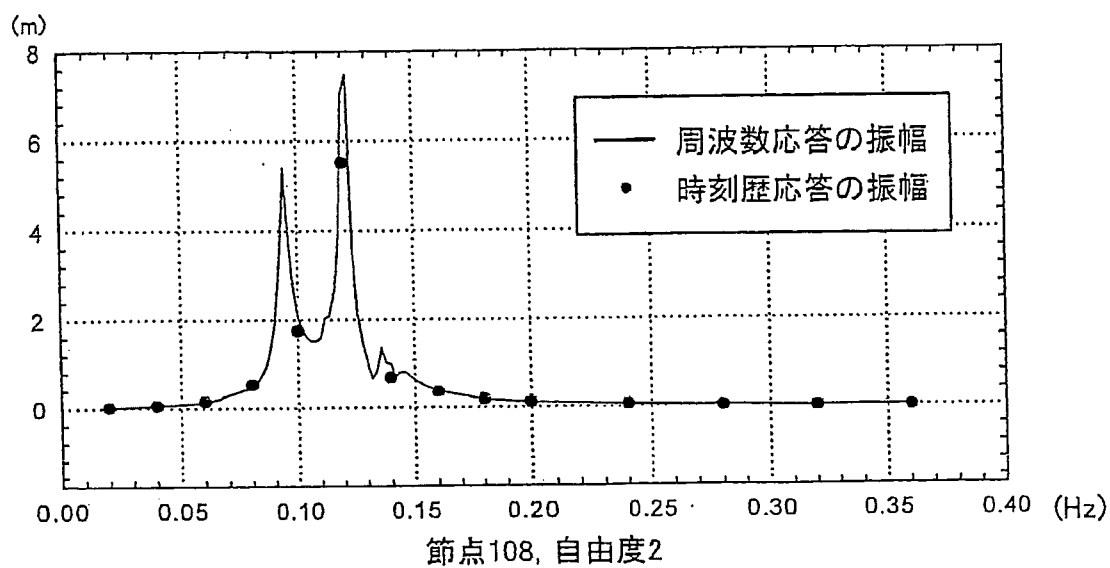


図-3.4.2-9 節点108における時刻歴応答の振幅と周波数応答の振幅の比較
(縦軸：振幅、横軸：入射波の周波数)

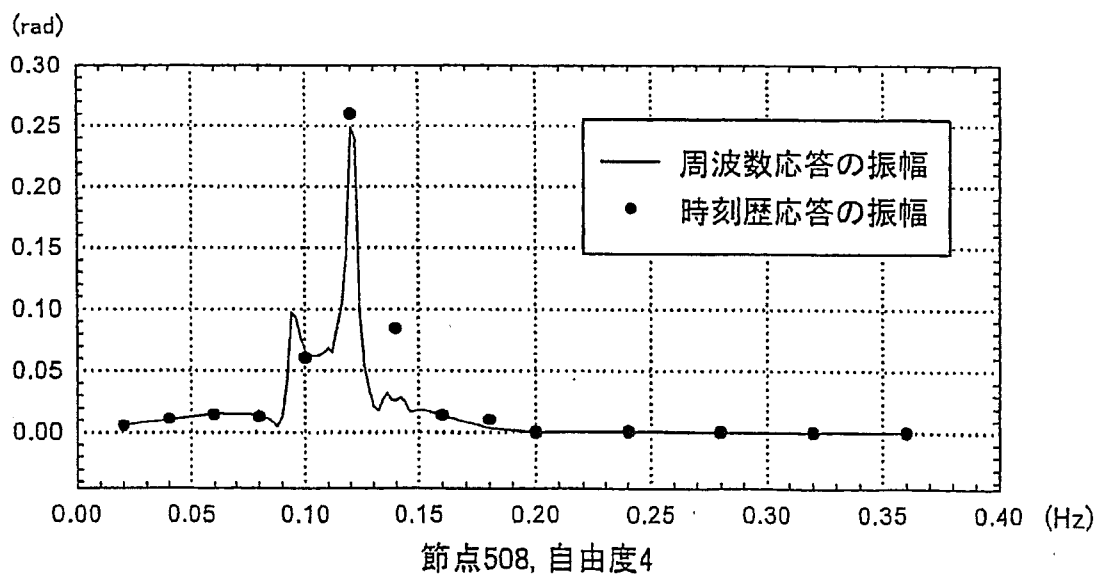
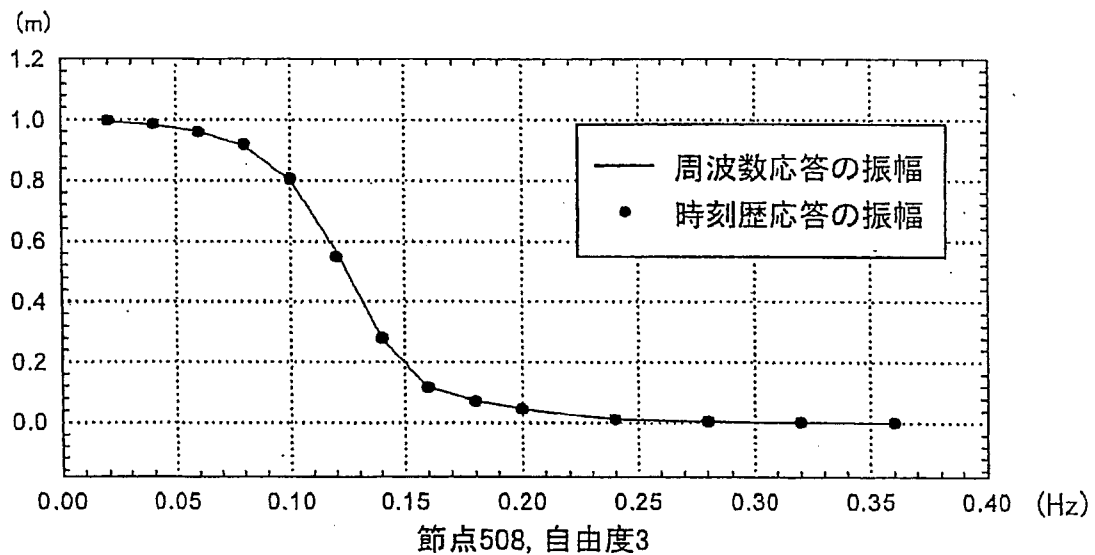
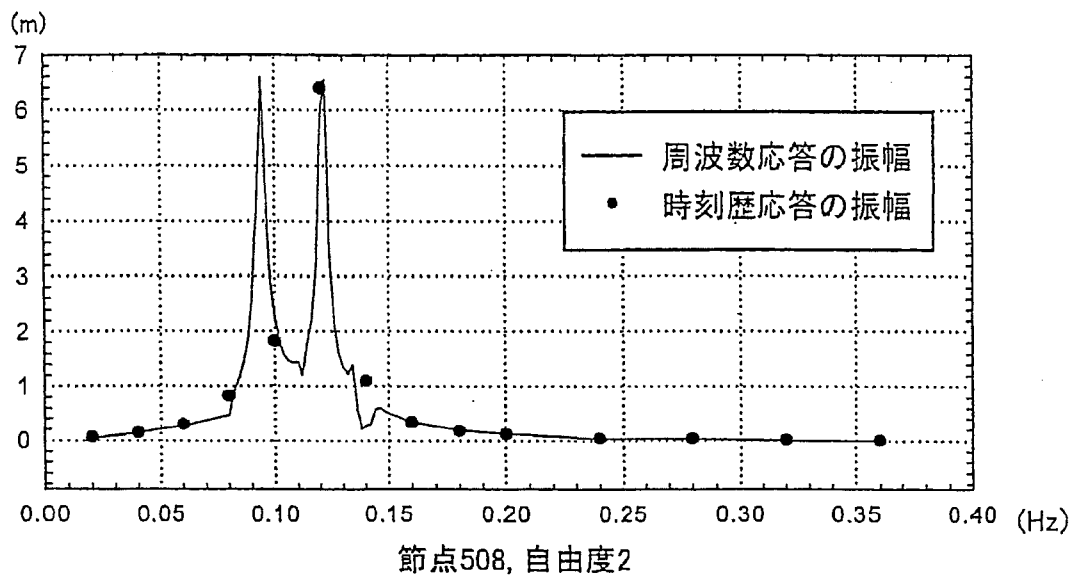
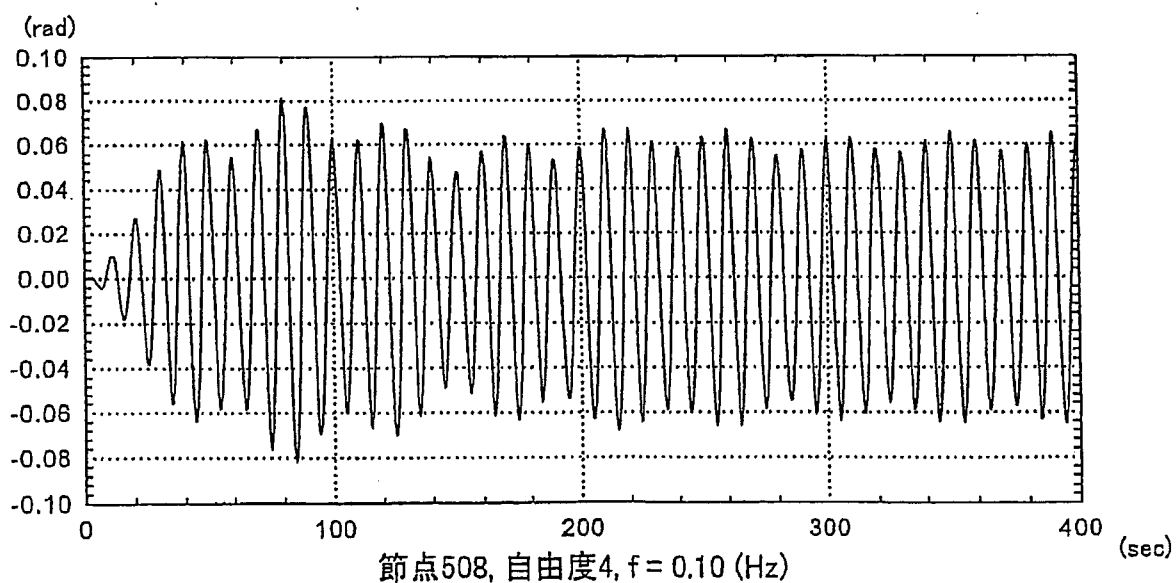
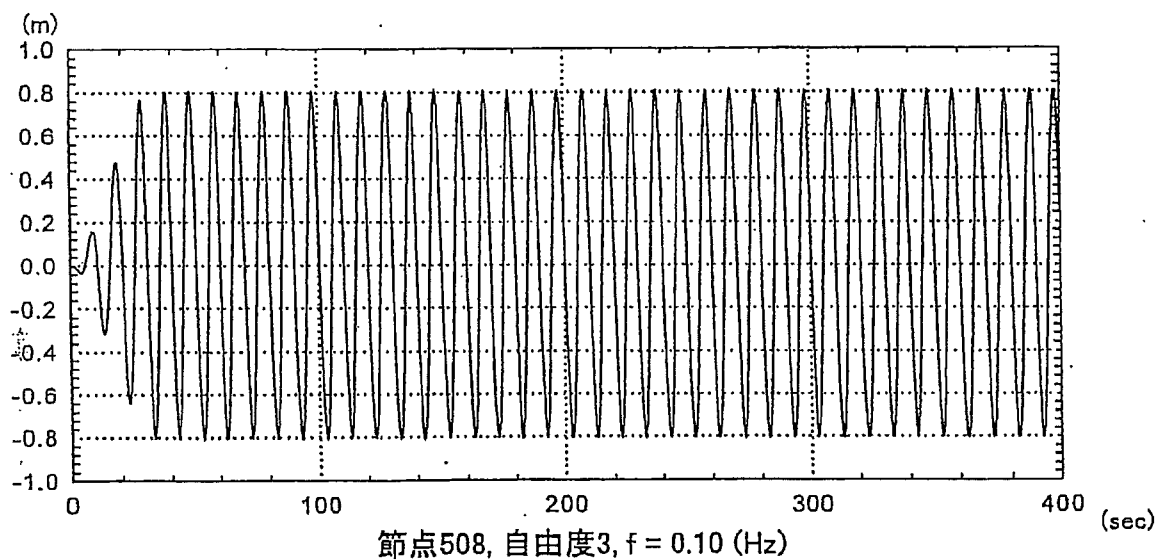
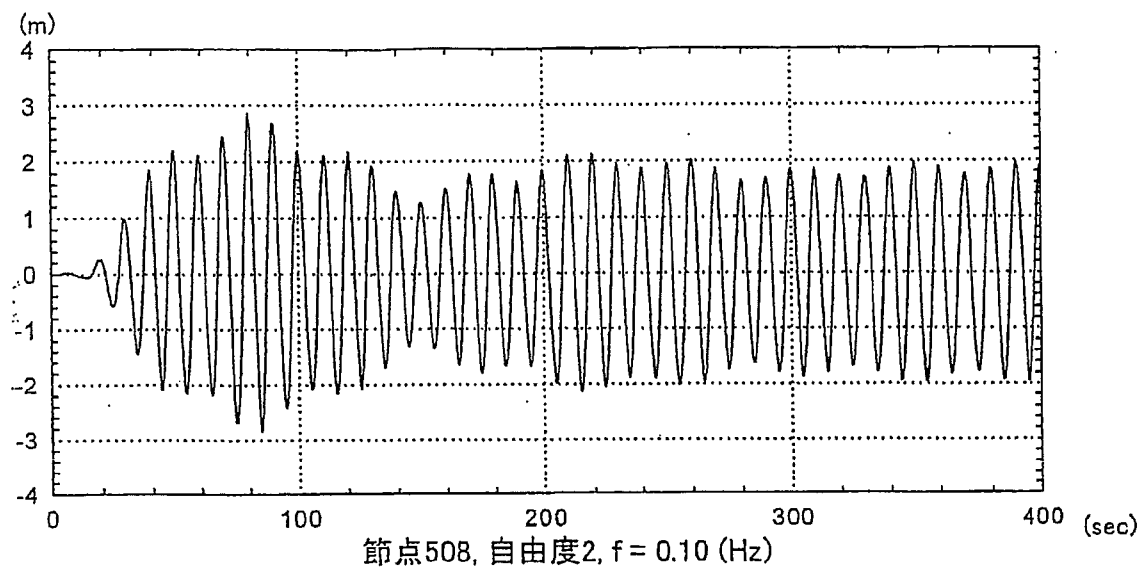
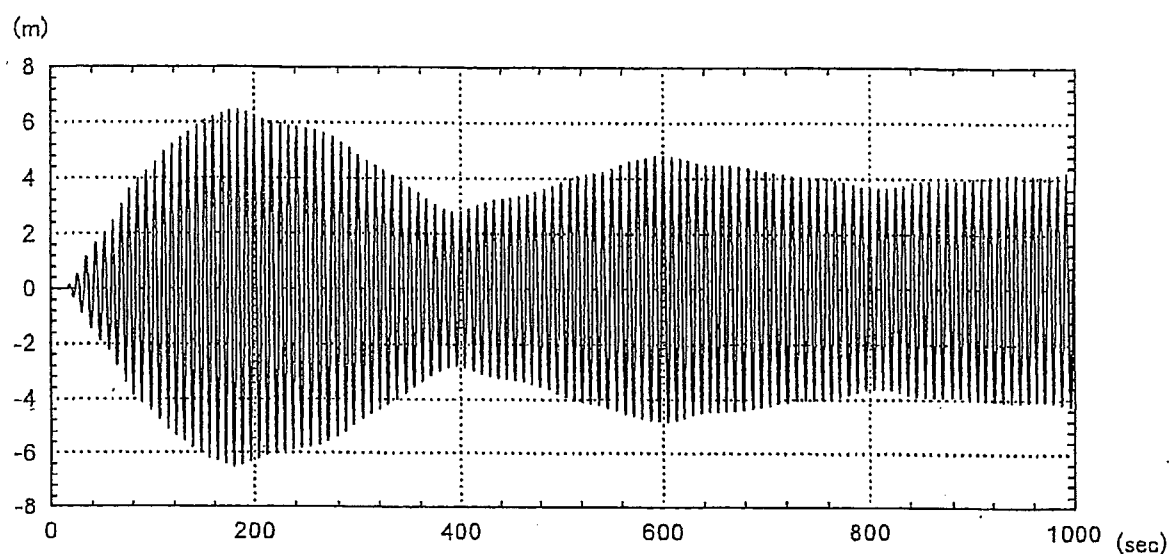


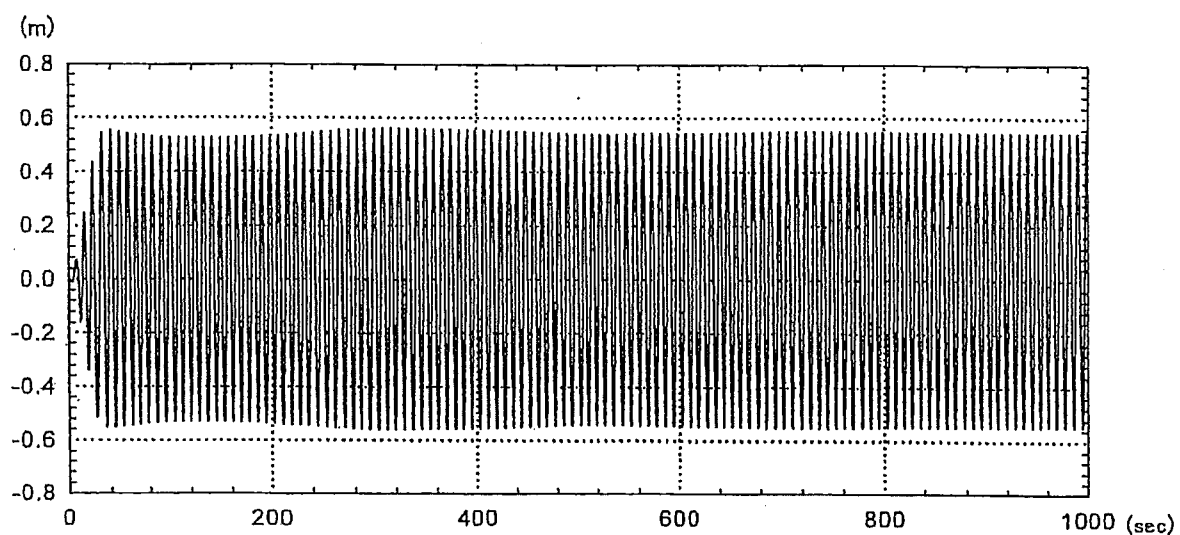
図-3.4.2-10 節点508における時刻歴応答の振幅と周波数応答の振幅の比較
(縦軸：振幅、横軸：入射波の周波数)



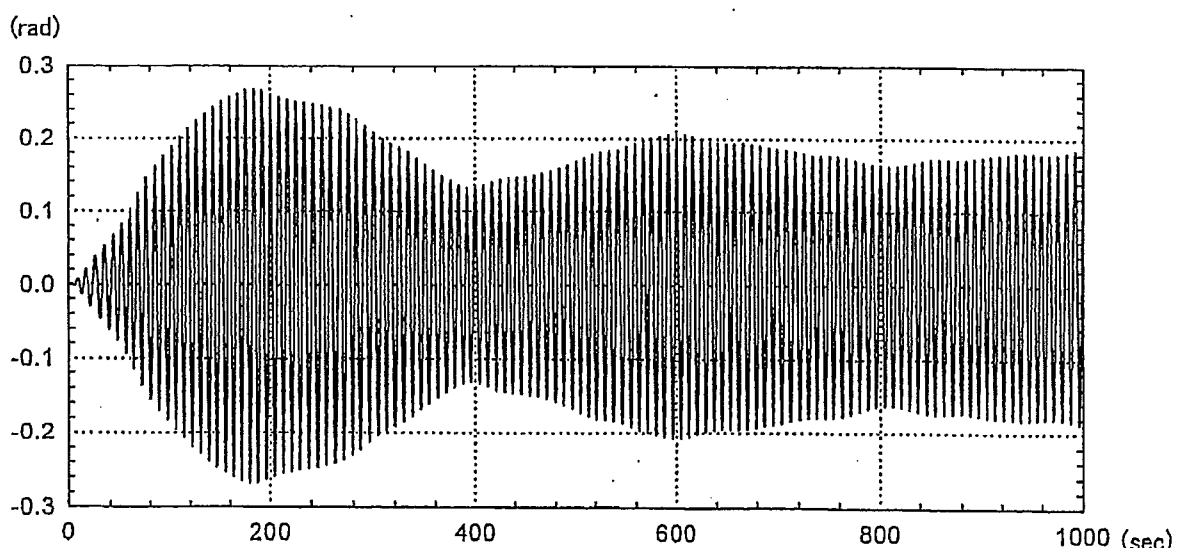
図一3.4.2-11 節規則波を受けたときの点508の挙動 ($f=0.10\text{Hz}$)
(縦軸：変位、横軸：時刻)



節点508, 自由度2, $f = 0.12$ (Hz)



節点508, 自由度2, $f = 0.12$ (Hz)



節点508, 自由度2, $f = 0.12$ (Hz)

図-3.4.2-12 節規則波を受けたときの点508の挙動 ($f=0.12\text{Hz}$)
(縦軸：変位、横軸：時刻)

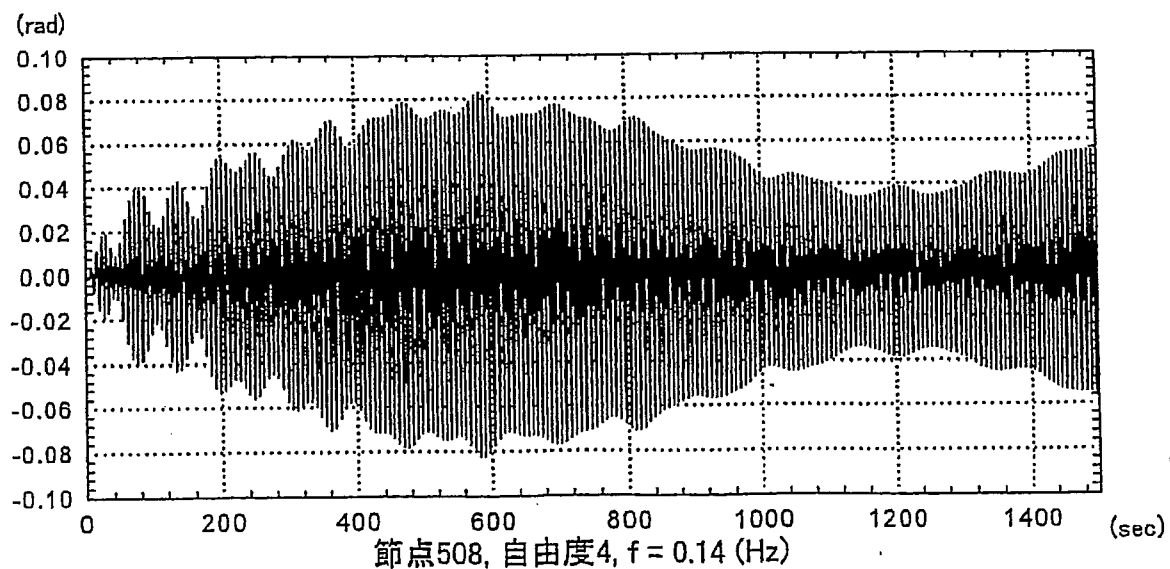
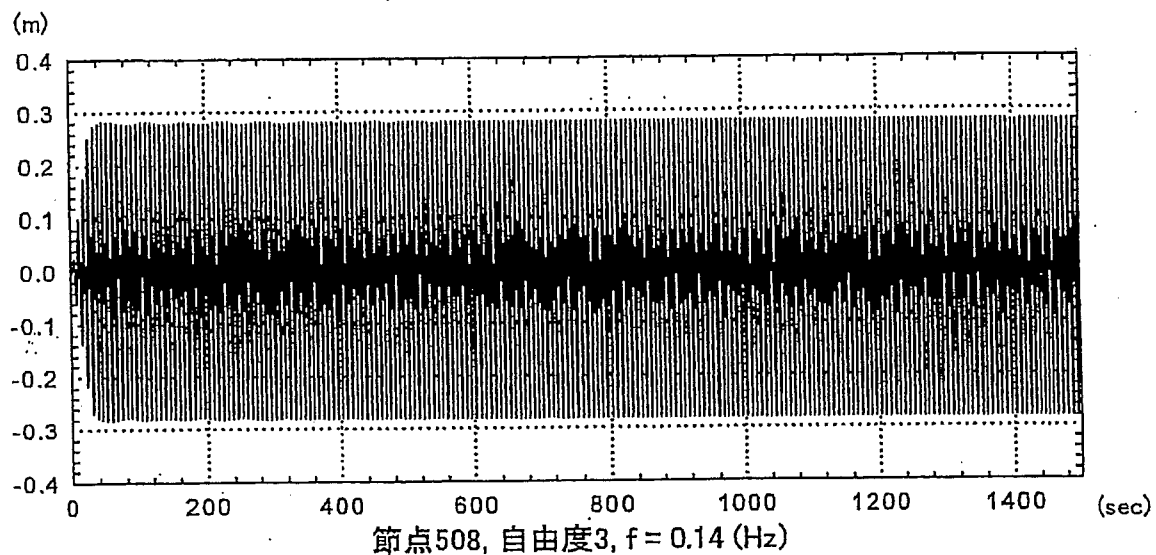
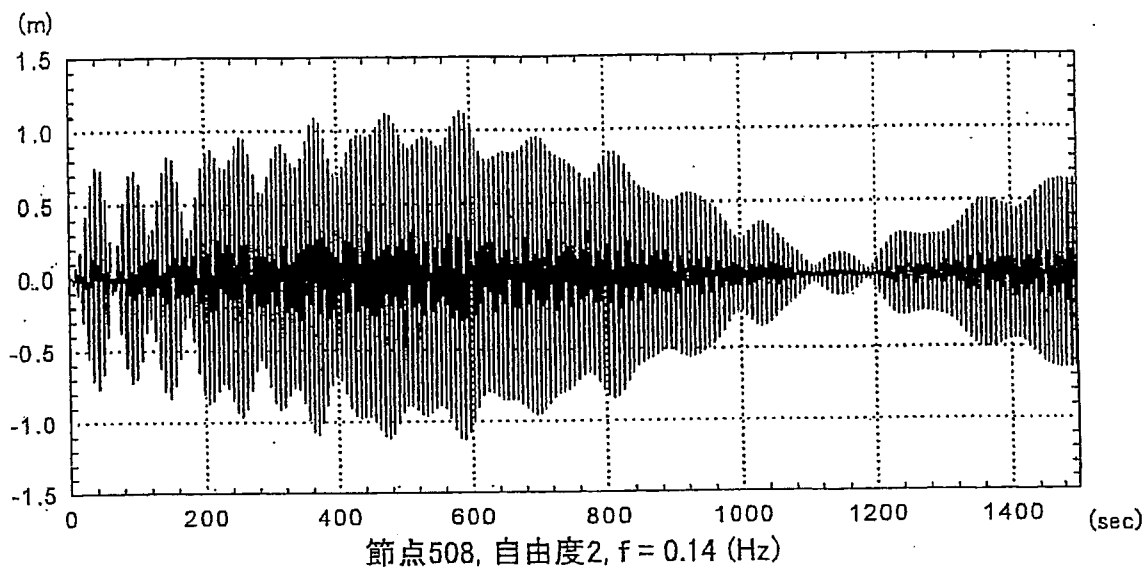


図-3.4.2-13 節規則波を受けたときの点508の挙動 ($f=0.14\text{Hz}$)
(縦軸：変位、横軸：時刻)

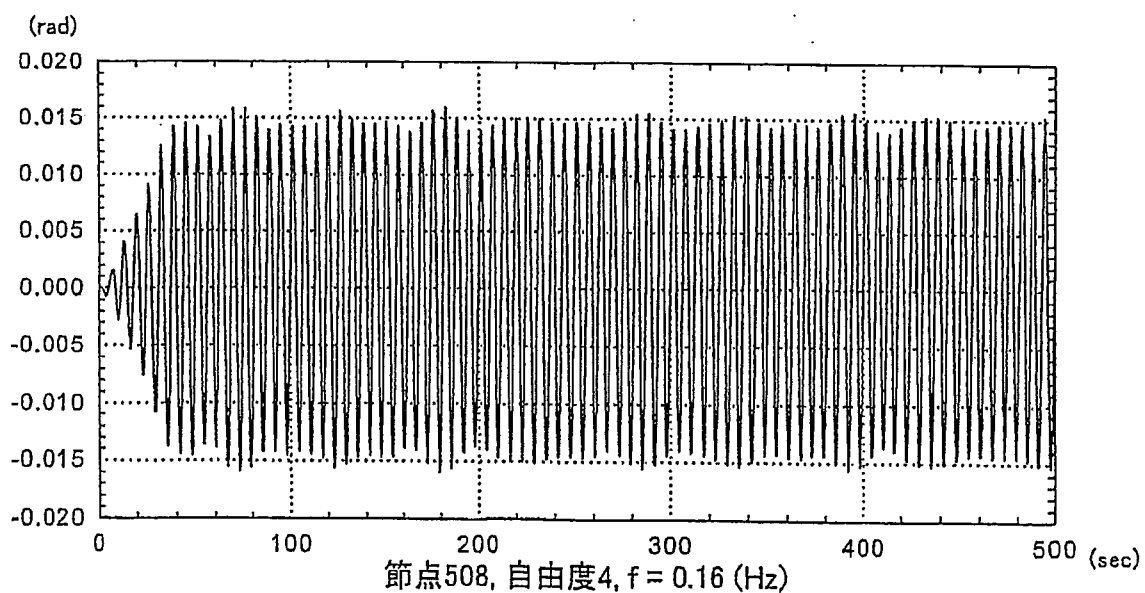
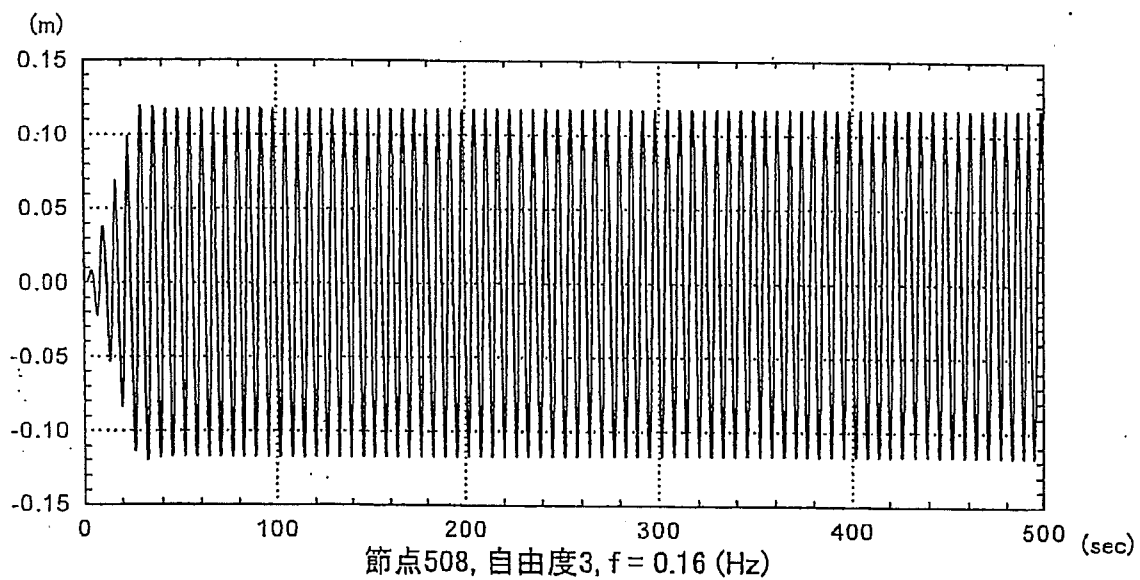
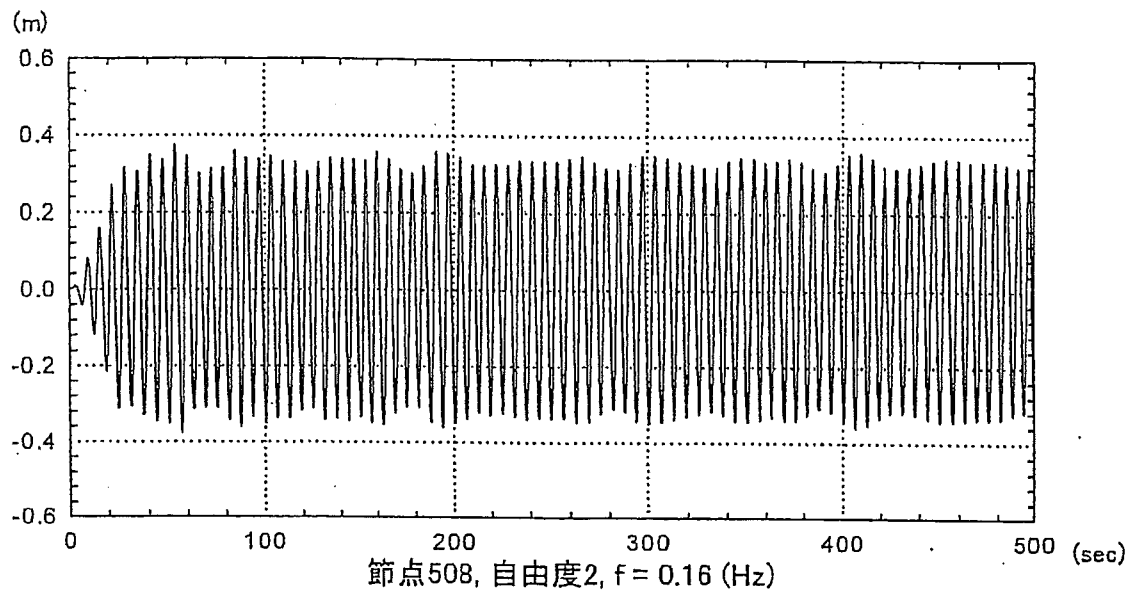


図-3.4.2-14 節規則波を受けたときの点508の挙動 ($f=0.16$ Hz))
(縦軸：変位、横軸：時刻)

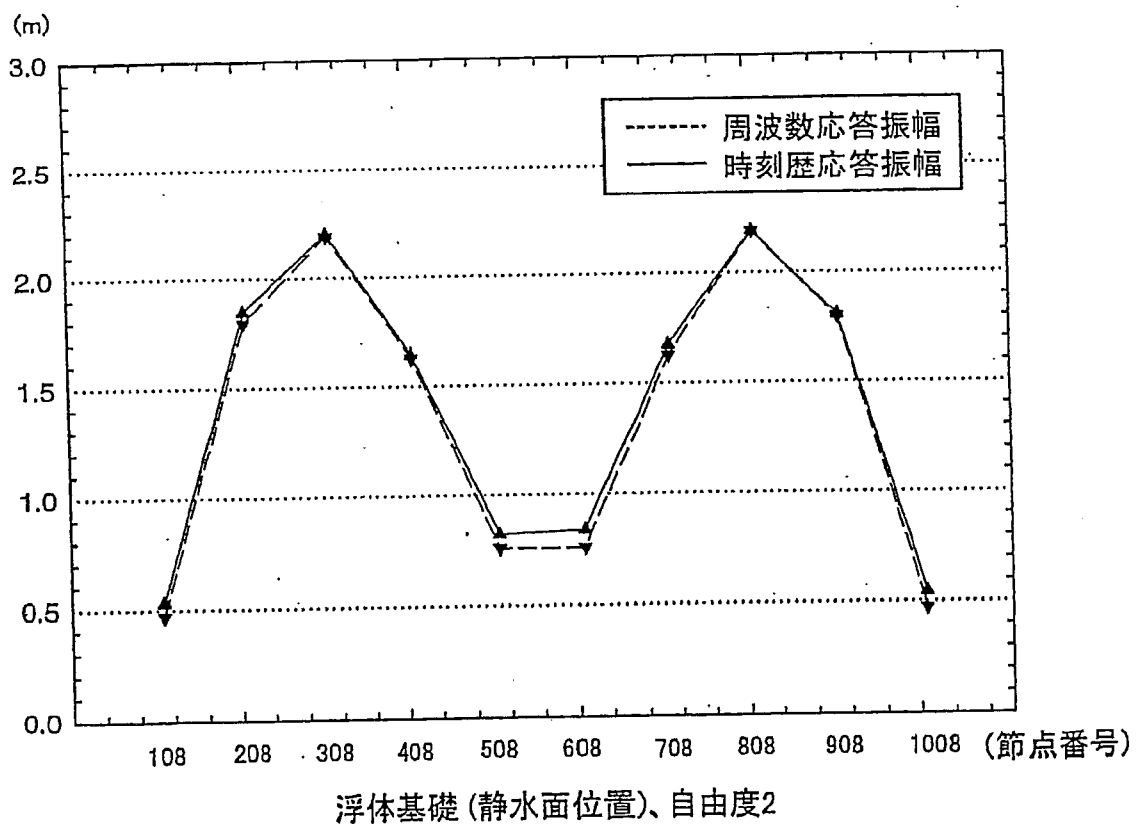
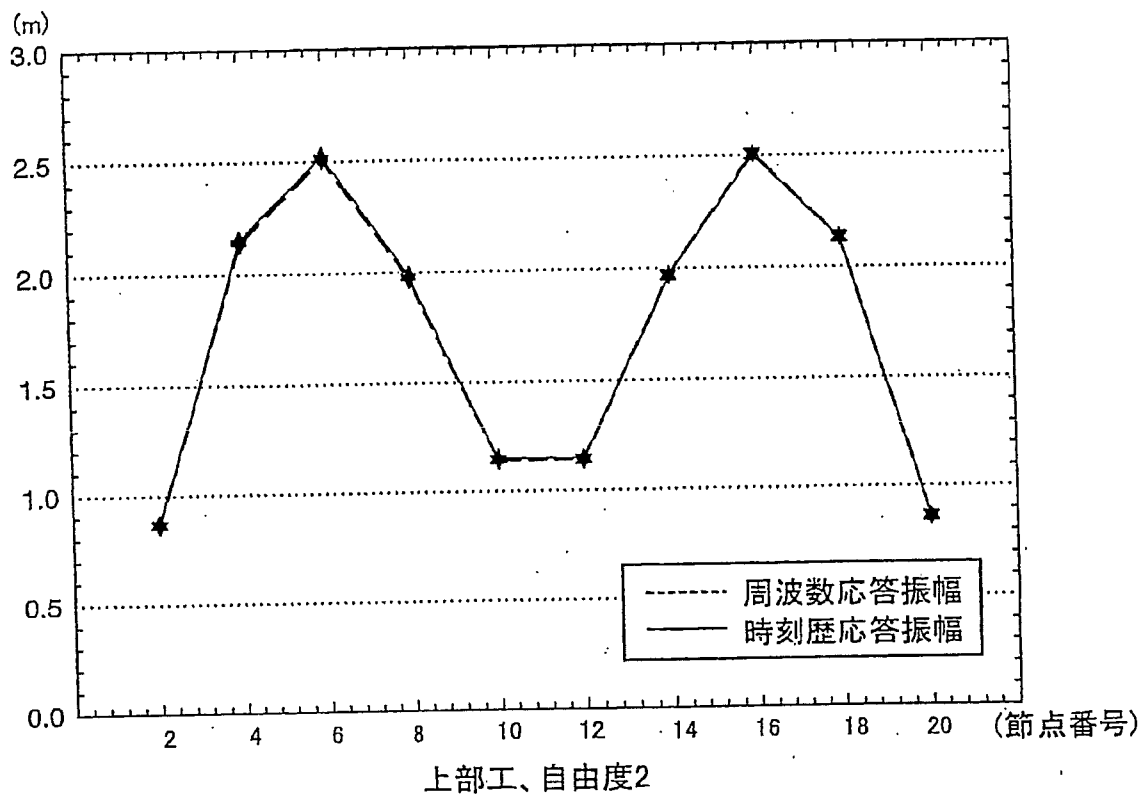


図-3.4.2-15 全体系の応答値 ($f=0.08\text{Hz}$)、自由度2
(縦軸：応答値、横軸：節点番号)

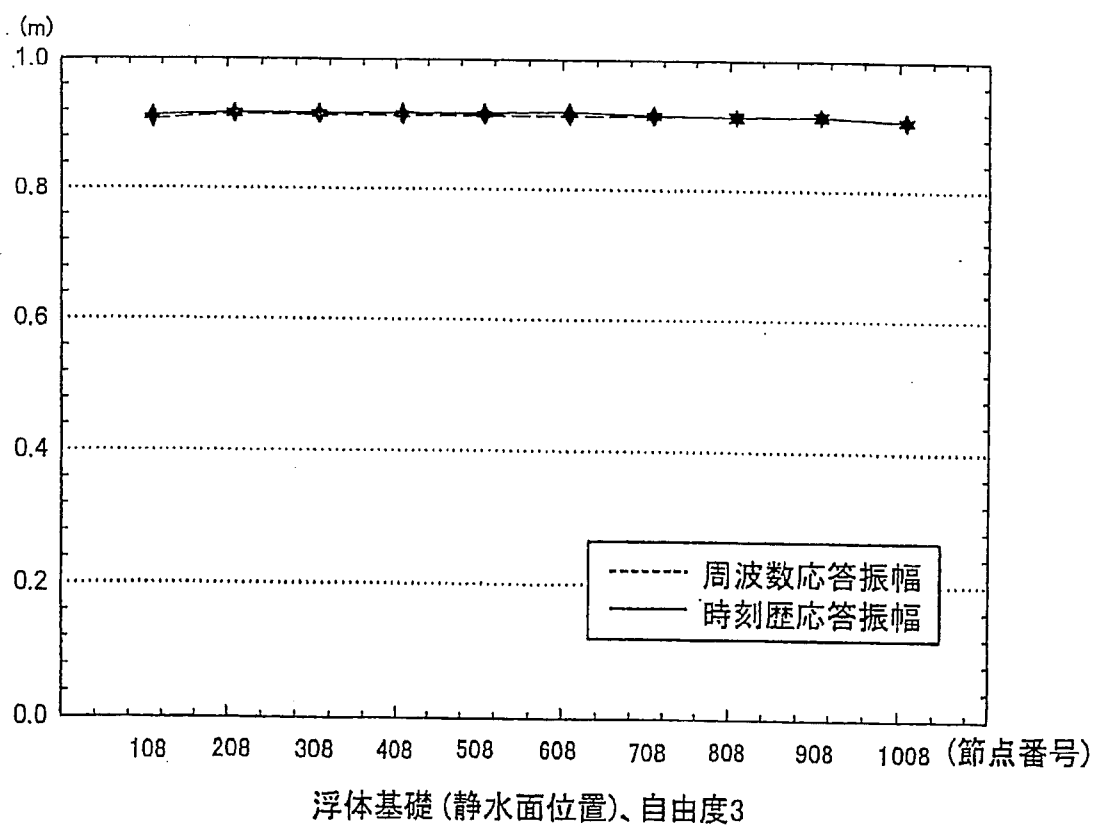
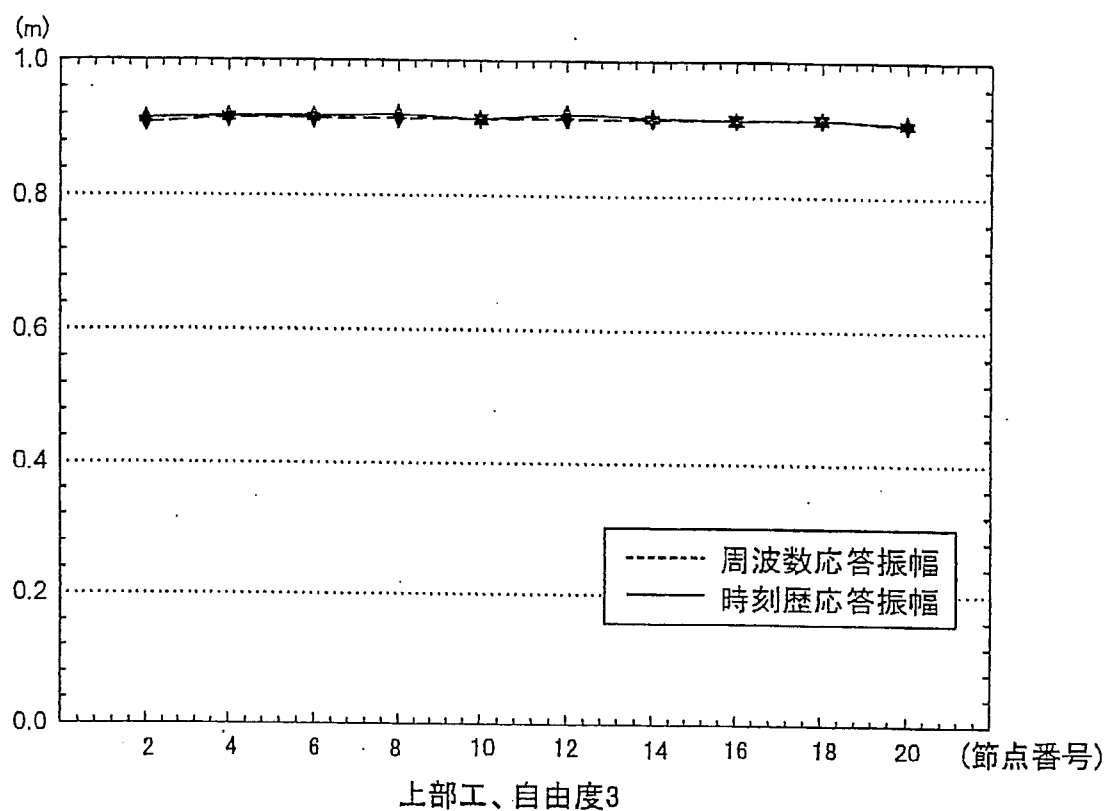


図-3.4.2-16 全体系の応答値 ($f=0.08\text{Hz}$)、自由度3)
(縦軸：応答値、横軸：節点番号)

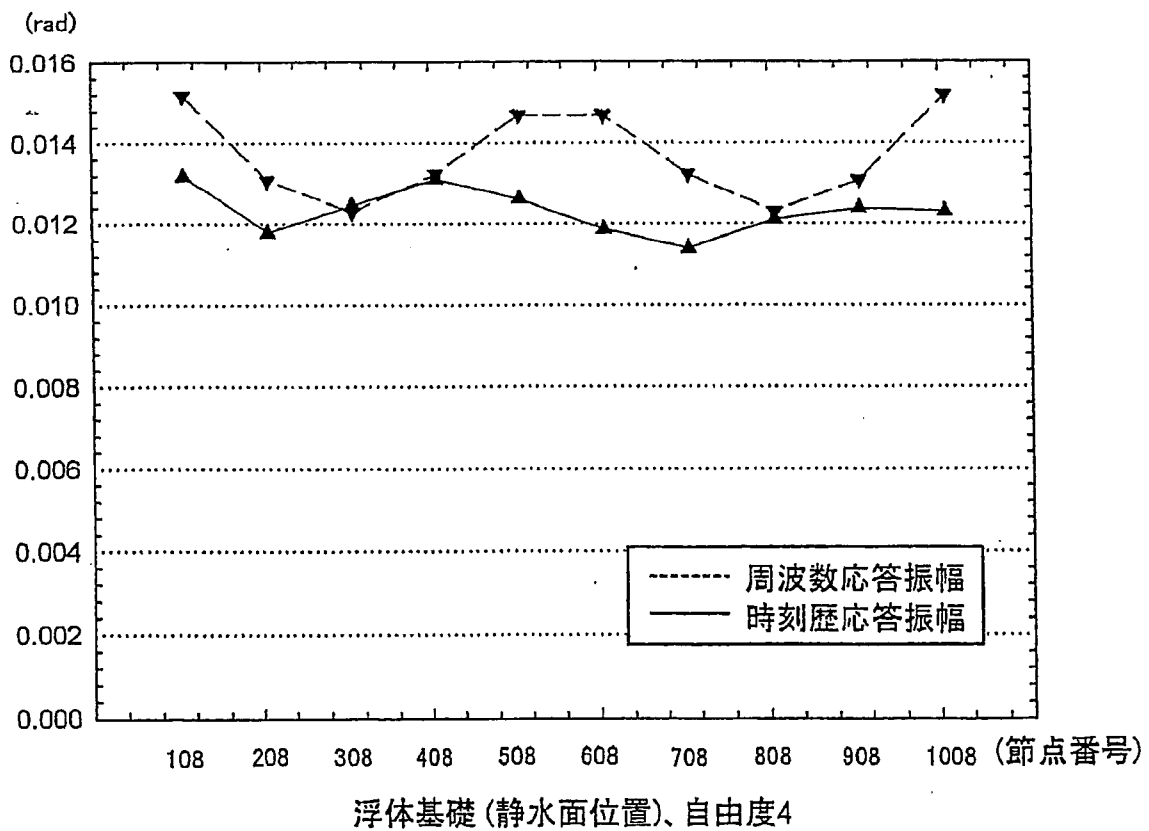
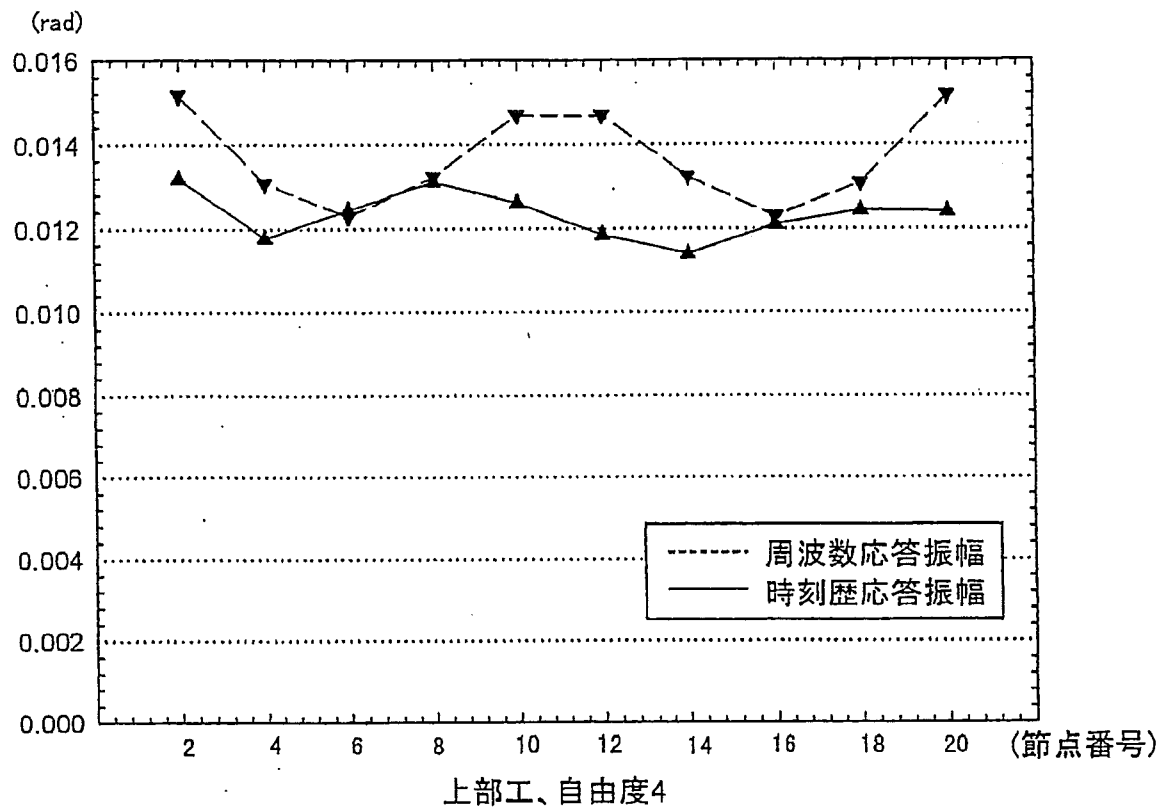


図-3.4.2-17 全体系の応答値 ($f=0.08\text{Hz}$)、自由度4)
(縦軸：応答値、横軸：節点番号)

$$S_i(\omega) = |X_i(\omega)|^2 S_0(\omega) \quad (3.4.2)$$

ここで、 $S_0(\omega)$ ：波のスペクトル、 $X_i(\omega)$ ：単位振幅波高あたりの波力、である。

波のスペクトルは各種のものが提案されているが、ここでは、土木工学や海岸工学の分野で広く用いられている *Bretschneider & 光易* の式による波のスペクトルを用いることとする。*Bretschneider & 光易* の式により波のスペクトルは振動数 f の関数として次式で表される。

$$S_0(f) = 0.258 \left(\frac{H_{1/3}}{g T_{1/3}^2} \right)^2 g^2 f^{-5} \exp \left\{ -1.03 (T_{1/3} f)^{-4} \right\} \quad (3.4.3)$$

ここで、 $H_{1/3}$ ：無次元化有義波高、 $T_{1/3}$ ：無次元化有義波周期、である。以後、単に有義波高、有義波周期と呼ぶ。これを周波数 ω の関数に書き換えると次式のようにになる。

$$S_0(\omega) = 0.258 \left(\frac{H_{1/3}}{g T_{1/3}^2} \right)^2 g^2 \left(\frac{\omega}{2\pi} \right)^{-5} \exp \left\{ -1.03 (T_{1/3} \frac{\omega}{2\pi})^{-4} \right\} \quad (3.4.4)$$

以上の方法によって不規則波力を発生させることができる。

(6) 解析結果および検証

運動方程式において強制波力として不規則波力を与え、*Newmark - β* 法を用いて時刻歴応答解析を行う。有義波周期を $T_{1/3} = 6.1(\text{sec})$ 、有義波高を $H_{1/3} = 1.0(\text{m})$ 、 $\Delta\omega = 0.05(\text{rad/s})$ として波のスペクトルを求め、不規則波を発生させた。入射角は橋軸直角方向とした。

検証には、時刻歴応答解の分散値と周波数応答解の分散の値が等しくなることを利用した。周波数応答解は前述の線形重ね合わせの原理により求めることができる。入力スペクトルとして波のスペクトル $S_0(\omega)$ を用い、周波数応答関数は周波数 ω の正弦波の波高に対する周波数応答の振幅 $R_i(\omega)$ とする。ただし、波のスペクトルは前述の *Bretschneider & 光易* の式によるものを用いる。つまり、周波数応答解のパワースペクトル $S_{i\zeta}(\omega)$ は次式で表される。

$$S_{i\zeta}(\omega) = |R_i(\omega)|^2 S_0(\omega) \quad (3.4.5)$$

周波数応答解より次式によって分散 σ_ω^2 を求める。

$$\sigma_\omega^2 = \int_0^\infty S_{i\zeta}(\omega) d\omega \quad (3.4.6)$$

一方、時刻歴応答解からは次式により分散 σ_i^2 が求まる。

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k^2(t) \quad (3.4.7)$$

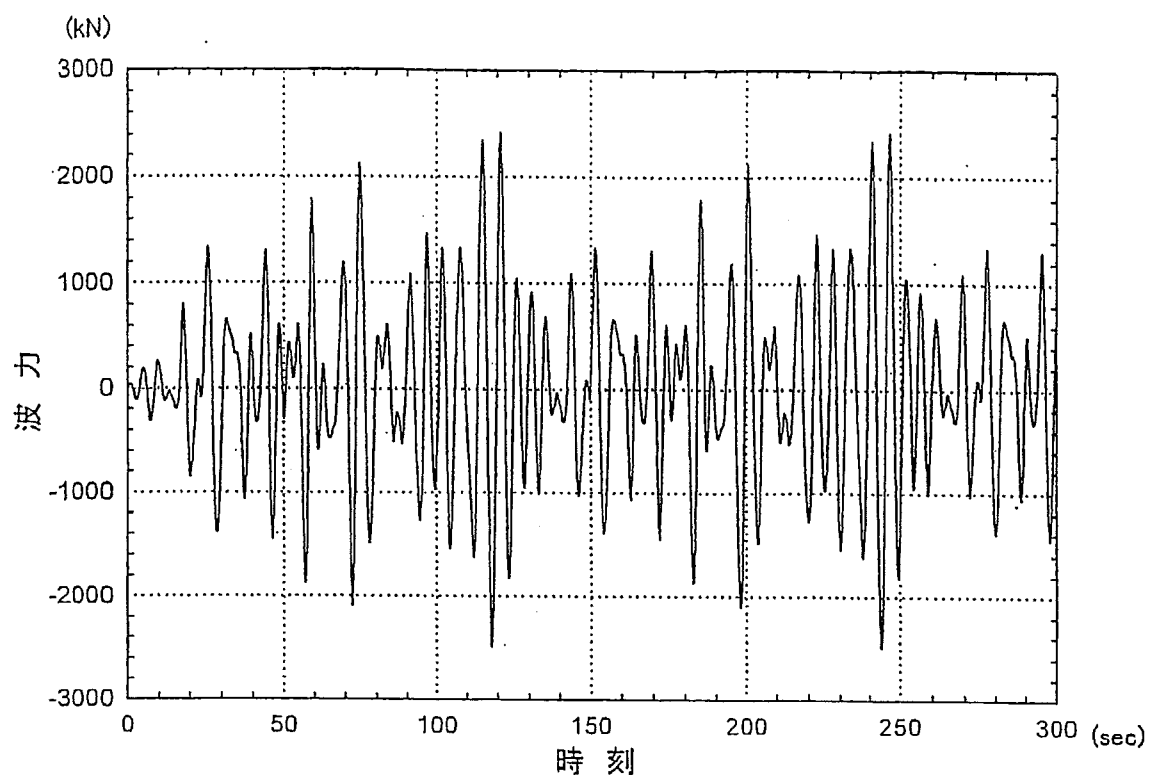
ただし、波力のエンベロープ及び過渡応答が影響している部分のデータを除外して行う⁶⁾。

時刻歴応答解の分散 σ_i^2 については以下の理由により平均値を用いることとした。式(3.4.1)によって不規則波力の時系列を発生させる際、同じスペクトルを持たせても重ね合わせる規則波の位相 θ_k の与え方によって異なった不規則波力の時系列が発生し、当然時刻歴応答も異なったものとなり、その分散もある程度ばらついた値となった。そこで、不規則波力の時系列を発生させる際、重ね合わせる規則波の位相 θ_k を5通り与え、ひとつのスペクトルに対し5通りの不規則波力の時系列を発生させた。そして、それぞれの不規則波力を与えた場合について時刻歴応答とその分散を式(3.4.7)により求め、その平均値をそのスペクトルに対する時刻歴応答解の分散 σ_i^2 とした。

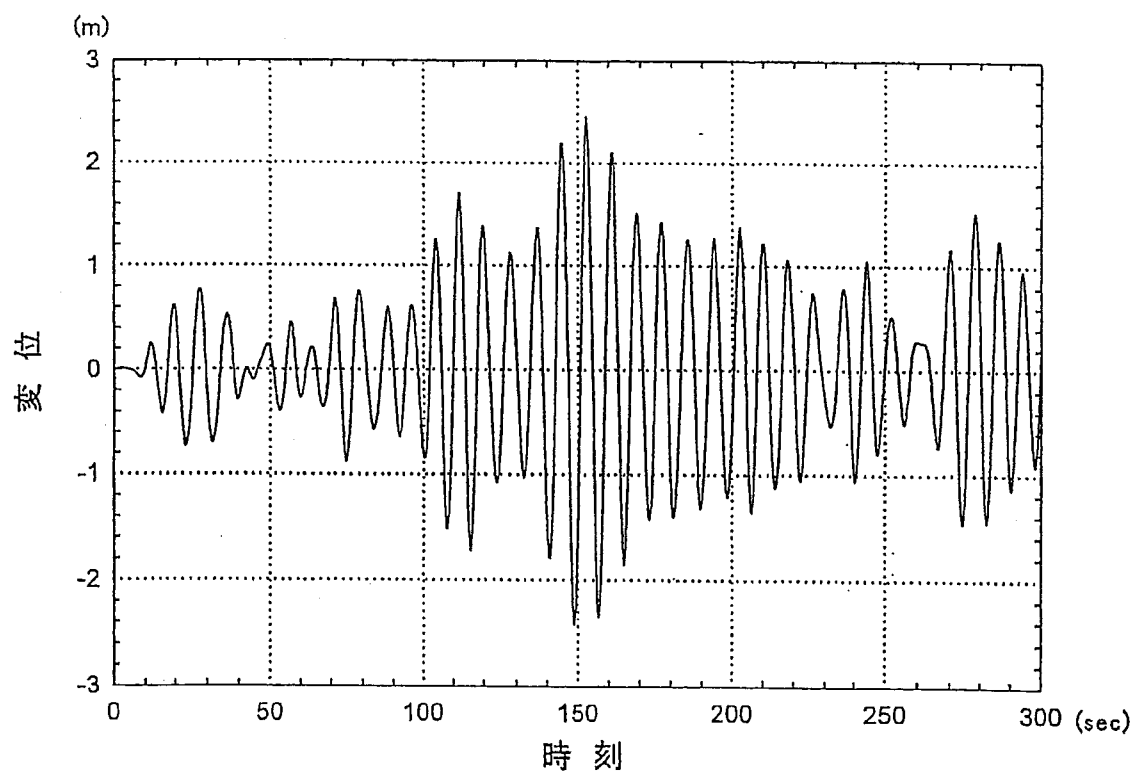
5通りの θ_k を与えることで5通りの結果を得た。一例として、 θ_1 の時の節点508番の時刻歴応答及び不規則波力を図-3.4.2-18～図-3.4.2-20に示した。代表節点として508番を選び、周波数応答解の分散 σ_ω^2 と時刻歴応答解の分散 σ_i^2 の値を比較した結果を表-3.4.3に示す。同表より、前述した通り、同じスペクトルを持たせても重ね合わせる規則波の位相 θ_k の与え方によって異なった不規則波力の時系列が発生し、時刻歴応答解の分散がばらついた値となっていることがわかる。周波数応答解の分散 σ_ω^2 と時刻歴応答解の分散 σ_i^2 を比較すると、大きな分散値を持つ自由度番号2,3において、両者の分散値はほぼ一致している。よって、時刻歴応答解析は正しく行われていると判断できる。

表-3.4.3 不規則波を与えたときの応答解析結果の検証

	節点 508 番の 自由度 2 の分散値	節点 508 番の 自由度 3 の分散値	節点 508 番の 自由度 4 の分散値
重ね合わせる 規則波の位相群 θ_1	0.3533	0.01506	0.0006256
重ね合わせる 規則波の位相群 θ_2	0.3834	0.01495	0.0007302
重ね合わせる 規則波の位相群 θ_3	0.3699	0.01549	0.0007205
重ね合わせる 規則波の位相群 θ_4	0.3740	0.01530	0.0007203
重ね合わせる 規則波の位相群 θ_5	0.3805	0.01484	0.0007366
時刻歴応答解の σ_i^2 ($\theta_1 \sim \theta_5$ の平均値)	0.3724	0.01513	0.0007066
周波数応答解の σ_ω^2	0.3781	0.01549	0.0005427

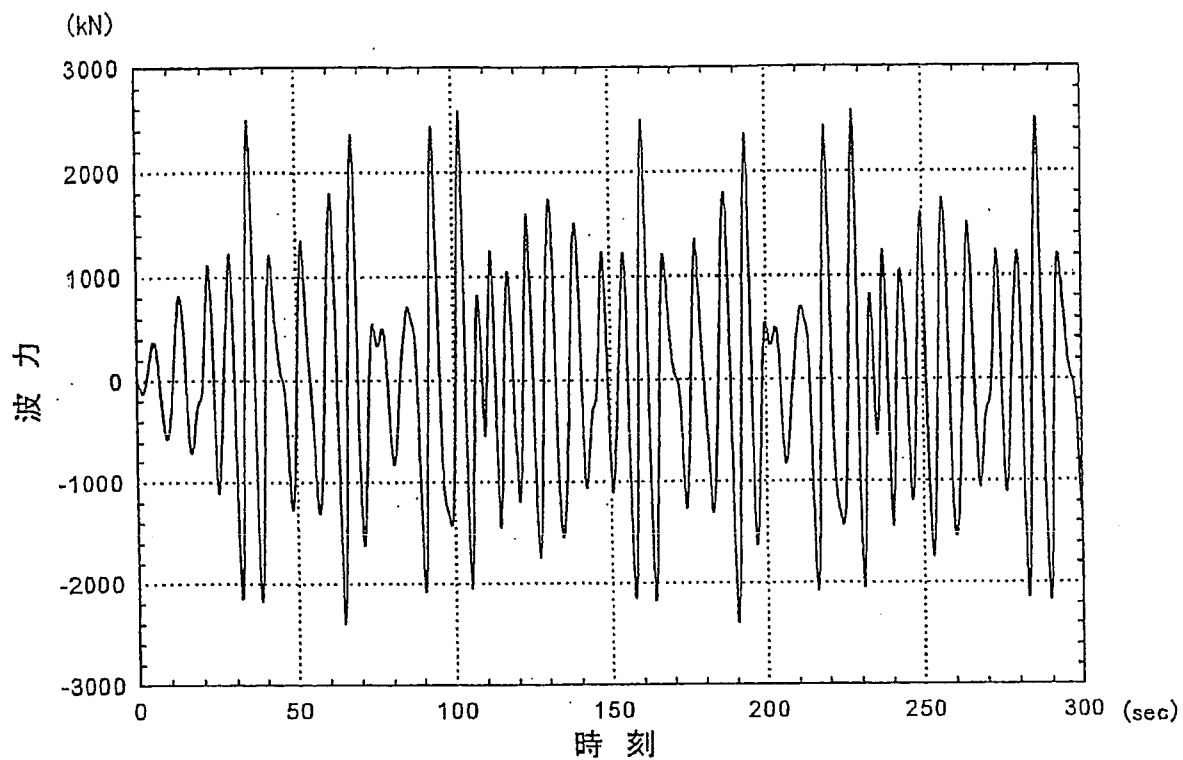


波力 (節点508, 自由度2)

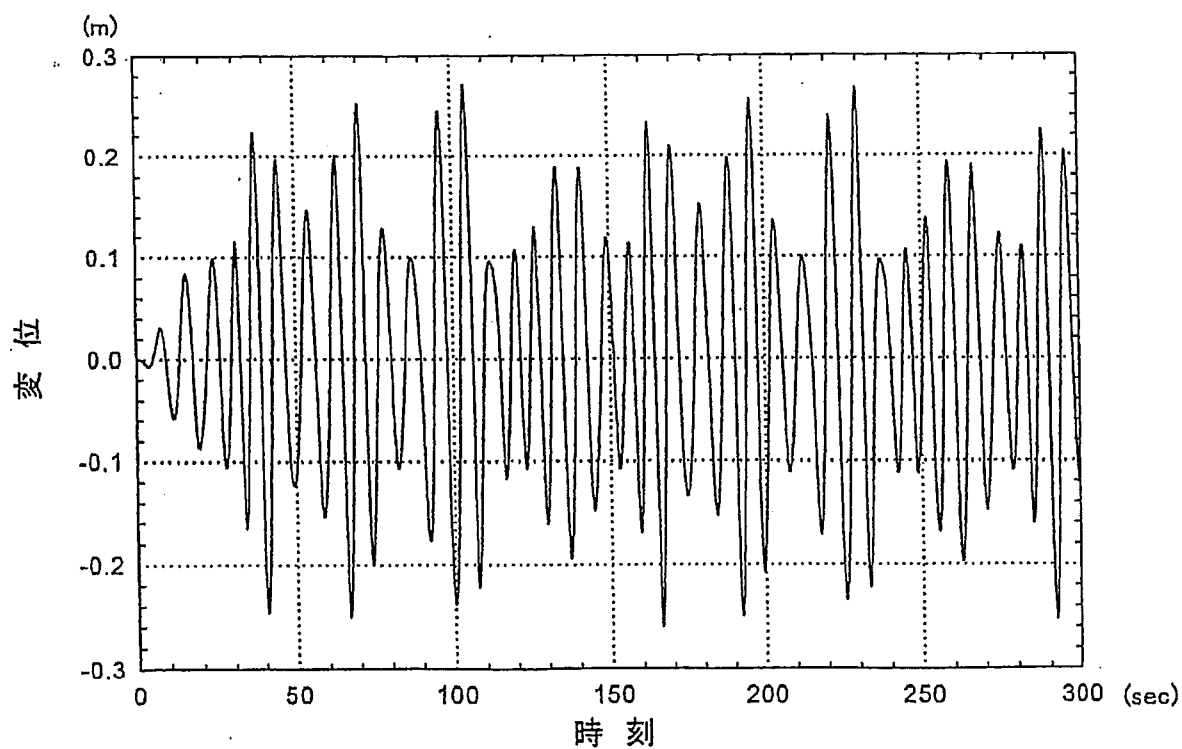


応答変位 (節点508, 自由度2)

図-3.4.2-18 不規則波を受けたときの節点508の時刻歴応答変位 (自由度2)

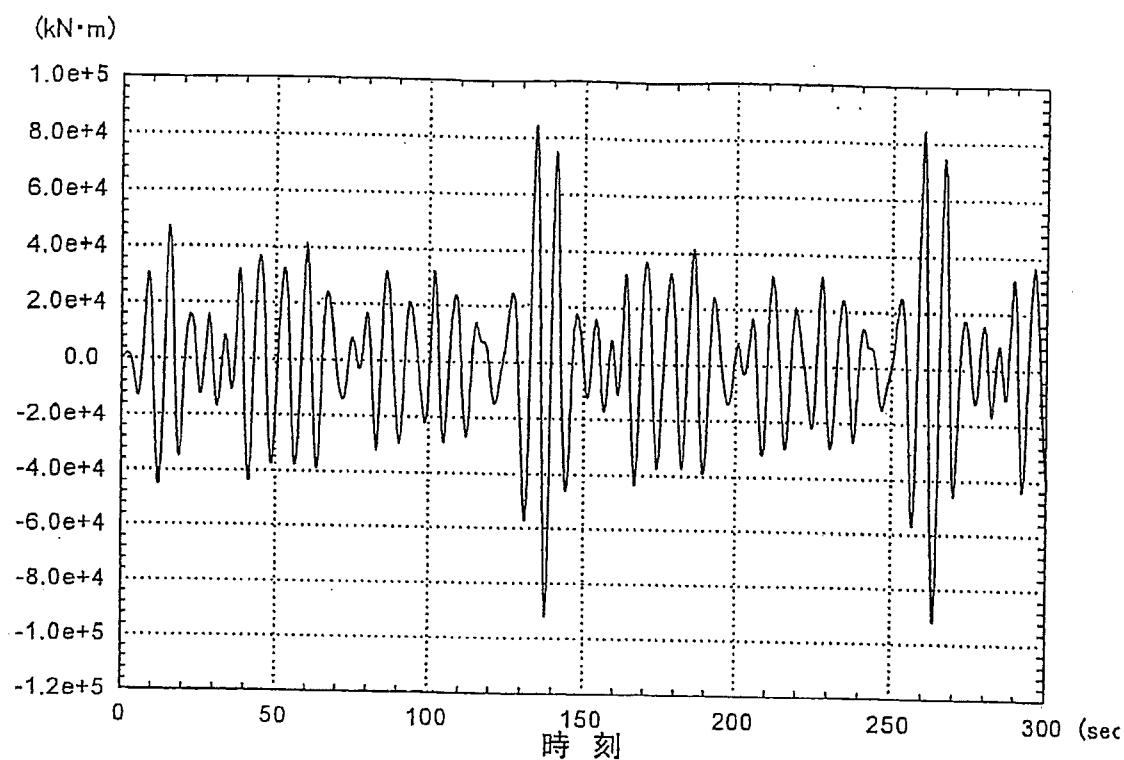


波力 (節点508, 自由度3)

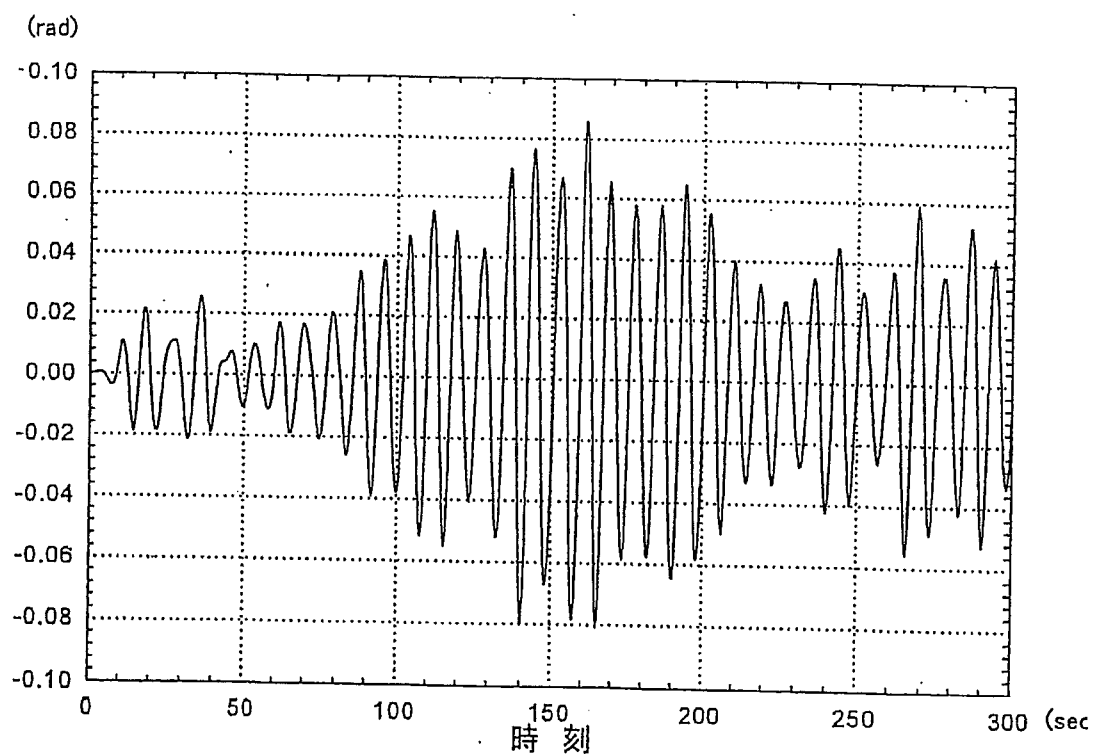


応答変位 (節点508, 自由度3)

図-3.4.2-19 不規則波を受けたときの節点508の時刻歴応答変位 (自由度3)



波力 (節点508, 自由度4)



応答変位 (節点508, 自由度4)

図-3.4.2-20 不規則波を受けたときの節点508の時刻歴応答変位 (自由度4)

3. 5 時刻歴応答解析手法の実験的検証

本項では、長さ 12m の 3 次元浮体橋模型による水槽模型実験を行い、実験結果と解析結果の比較を通して本研究で開発した時刻歴応答解析手法の実験的検証を行う。

3. 5. 1 実験方法

(1) 概要

図-3.5.1 に示すように、日立造船(株) 所有の風洞設備の長さ 23m、幅 8m の風路部分に、長さ 12m、幅 5.4m、深さ 0.22m の造波水槽を設置し、その中に 3 次元浮体橋模型を浮かべて係留し、これに波と風を作用させた時の浮体橋動揺実験を実施した。実験では、風速、波周期等を変化させ、浮体橋の運動変位、桁端位置での係留力、波高等を計測した。また、浮体橋の風と波の複合外力作用時の応答特性を把握するために、外力として、波が単独で作用する場合、風が単独で作用する場合、波と風が同時に作用する場合の 3 ケースを対象に実験を行った。波と風が同時に作用する場合の風速としては、暴風時の実橋換算風速 43m/s を用いた。実験では、波周期、係留バネ、風速などの条件を変えて多数の実験を実施した。各ケースでの外力の詳細を以下に示す。

- ・ 実橋換算風速：4.8～50.8(m/s)の 4(m/s)きざみ
- ・ 波周期（実機換算）：4(sec.)～15(sec.)の 1(s)きざみ
- ・ 実橋想定水深 9m(模型実験水深 18cm)
- ・ ポンツーンの係留バネ定数：2.84(N/cm)
- ・ 気流条件：境界層乱流(1/5 ベキ関数)

実験の様子を図-3.5.2、3.5.3 に示す。

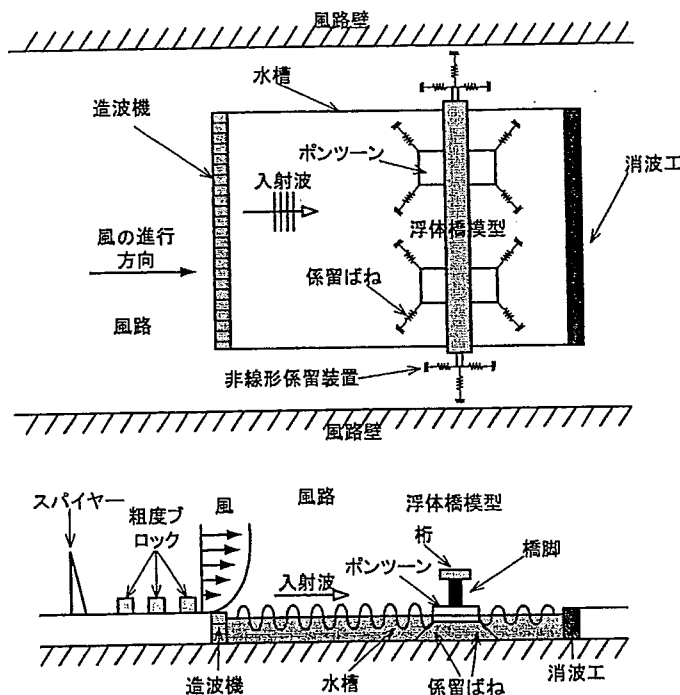


図-3.5.1 実験概要

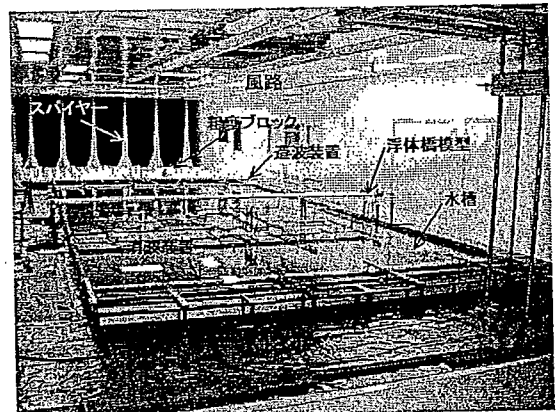


図-3.5.2 実験全体の様子

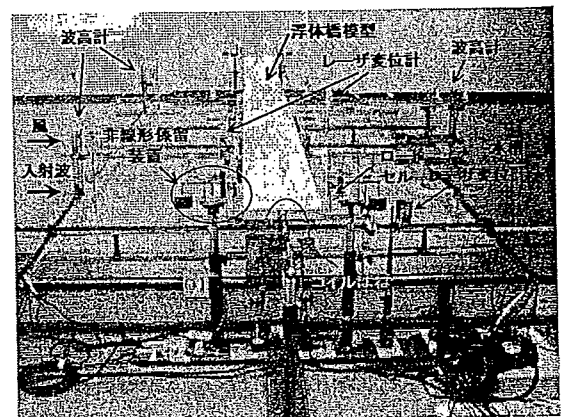


図-3.5.3 浮体橋の横方向からの様子

(2) 浮体橋模型

浮体橋模型は、図-3.5.4 に示すように、2 個のポンツーン、弾性体としての steel 製の剛性棒に桁外形材を取り付けた上部工、上部工とポンツーンを繋ぐ橋脚からなる。この浮体橋模型は、2 車線の自動車専用道路用の 7 径間連続鋼床版箱桁橋として実橋の概略設計を実施し、その中央部を対象にしたもので、模型の縮尺は 1/50 である。桁外形材は、ブロック長を 228mm とした。表-3.5.1 に浮体橋の実橋と模型の主要寸法を示す。実橋の上部工桁高は 5m（桁幅と桁高の比： $B/D=3.0$ ）であるが、模型の上部工高さは実橋で 2m（ $B/D=7.5$ ）に対応する値に変更している。これは、 $B/D=7.5$ の桁断面に関しては、2 次元断面を対象とした静的空気力係数が、別途、風洞実験で詳細に計測されており、本実験に対応する骨組構造浮体橋の風・波作用下での動揺シミュレーション計算を行う場合、都合がよいと判断されたためである。

剛性棒の断面は H 型とし、橋軸方向の弾性梁として、鉛直方向と水平方向の曲げ剛性を実橋（ $B/D=3.0$ ）と相似にした。ねじり剛性についても実橋とほぼ相似になっている。ポンツーンと橋脚はネジ止めによる剛結合で、それぞれは剛体模型である。橋脚と桁は板バネを介した弾性結合としている。また分布荷重、慣動半径及び断面 2 次モーメント等がほぼ同等になるように上部工、橋脚、ポンツーンにバランスウェイトを配置している。

表-3.5.2 に主要振動モードである sway(水平方向)、heave(鉛直方向)、roll(回転方向)の固有振動数及び固有周期の計測結果を示す。

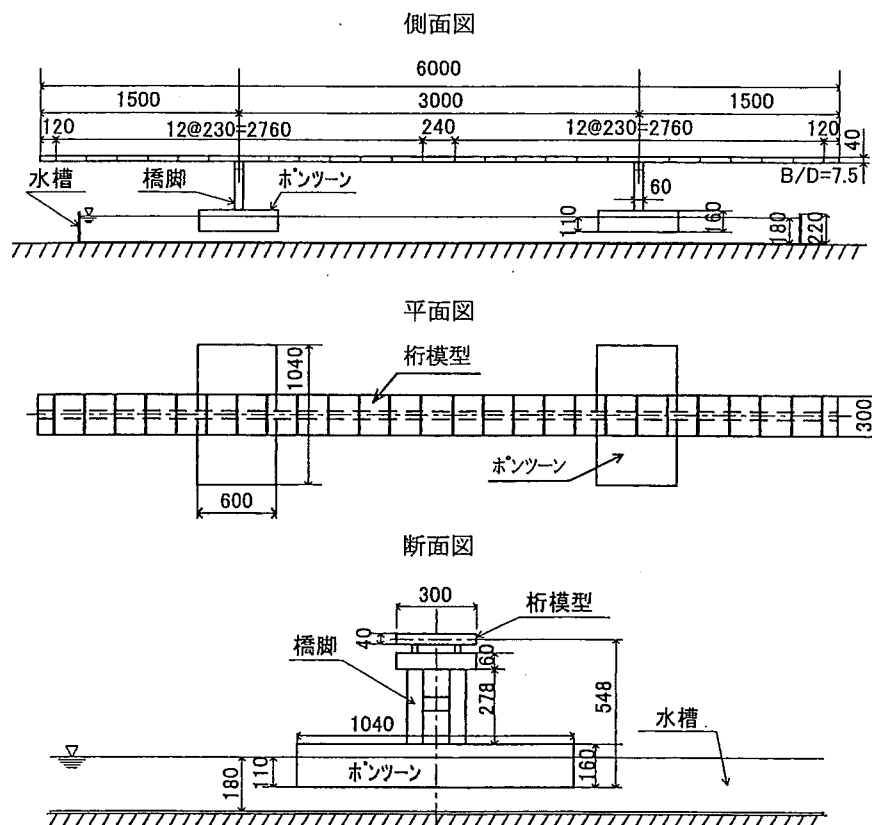


図-3.5.4 浮体橋模型 (単位:mm)

表-3.5.1 主要寸法

諸元	実機	模型(1/50)
浮体橋全長	300.0 (m)	6.00 (m)
中央径間支間長	150.0 (m)	3.00 (m)
桁幅 B	15.0 (m)	0.30 (m)
桁高さ D	5.0 (m)	0.04 (m)
B/D	3.0	7.5
橋脚高さ	18.0 (m)	0.36 (m)
ポンツーンの長さ	52.0 (m)	1.04 (m)
ポンツーンの幅	30.0 (m)	0.60 (m)
ポンツーンの高さ	8.0 (m)	0.16 (m)
喫水	5.5 (m)	0.11 (m)
排水容積	8579 (m ³)	68640 (cm ³)
重心の高さ KG	13.16 (m)	26.32 (cm)
橋軸回りのGM	30.57 (m)	61.14 (cm)

表-3.5.2 主要モードの固有振動数及び固有周期

振動モード	固有振動数 (Hz)		固有周期 (sec.)	
	実機ベース	模型ベース	実機ベース	模型ベース
sway	0.16	1.12	6.31	0.89
heave	0.07	0.49	14.43	2.04
roll	0.10	0.73	9.69	1.37

(3) 係留方法

図-3.5.5 に示すように、浮体橋実機は両桁端の 4 カ所に水平運動を拘束するゴム防舷材があり、かつ、それぞれのポンツーン底部の 4 隅点でカテナリー係留されていると想定し、ゴム防舷材を非線形係留装置、カテナリー係留を線形バネ係留でモデル化した。また、この浮体橋模型が 7 径間連続鋼床版箱桁橋の中央部を対象にしており、浮体橋模型の両側に橋体が繋がっている条件を考慮するために、両桁端で橋軸方向、鉛直方向に線形バネを設置した。ポンツーン及び桁端の鉛直方向と橋軸方向の各バネ 1 本分のバネ定数は、それぞれ 2P-①～④及び 3P-①～④は 2.84N/cm、2P-⑤及び 3P-⑤は 0.39N/cm、2P-⑥～⑦及び 3P-⑥～⑦は 3.92N/cm である。

図-3.5.5 の F1～F4 で示す位置にゴム防舷材対応の非線形係留装置を設置した。この装置はゴム防舷材の変位-荷重特性を模擬したもので、図-3.5.6 に示すとおり実機のゴム防舷材の変位-荷重関係を折れ線状の変位-荷重特性で表すことができる。これはゴム防舷材の変位-荷重曲線の線形領域を線形板バネ①、高反力領域の線形部分を線形板バネ②で表すものである。

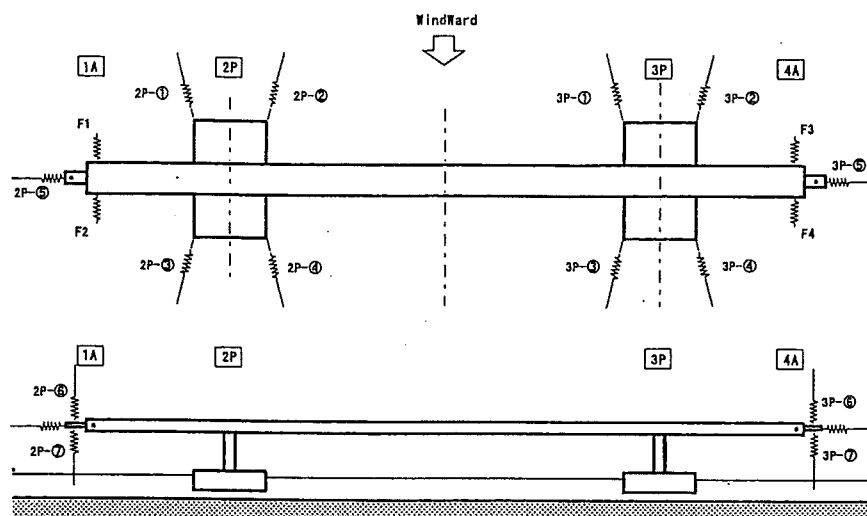


図-3.5.5 係留バネの配置と名称

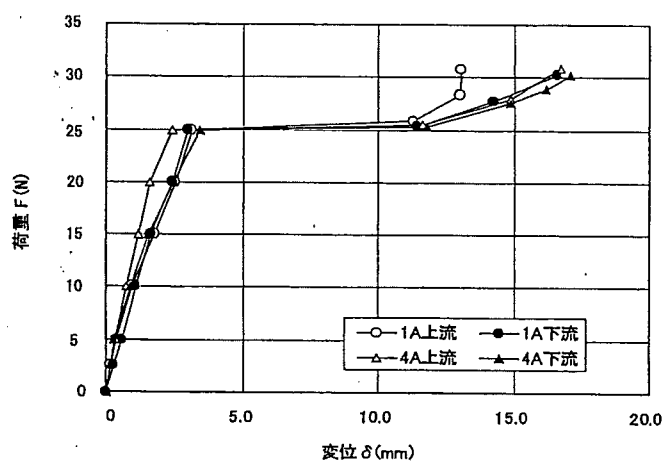
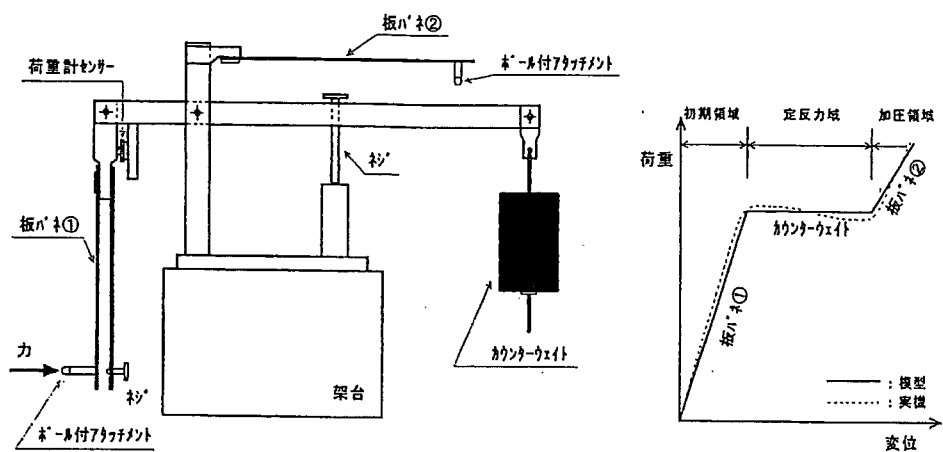


図-3.5.6 係留装置一般図及び係留特性

3. 5. 2 実験結果

図-3.5.7 に外力が波単独の場合および波と風が同時に作用する場合の 2 ケースについて、中央径間 $L/2$ 位置での模型弾性変位の両振幅最大値における周波数特性を示す。外力が波単独の場合より波と風が同時に作用する場合の方が応答は大きくなる傾向にあり、桁断面に作用する風荷重が影響していることがわかる。しかし、模型の応答変位は全般的に風荷重の影響よりも波の影響が顕著といえる。また、水平変位応答のピークが波周期 6(s)付近に、鉛直変位のピークが 15(s)付近に、ねじれ変位のピークが 9(s)付近にそれぞれ現れている。これは、表-3.5.2 に示すそれぞれのモードの固有周期におおよそ対応している。

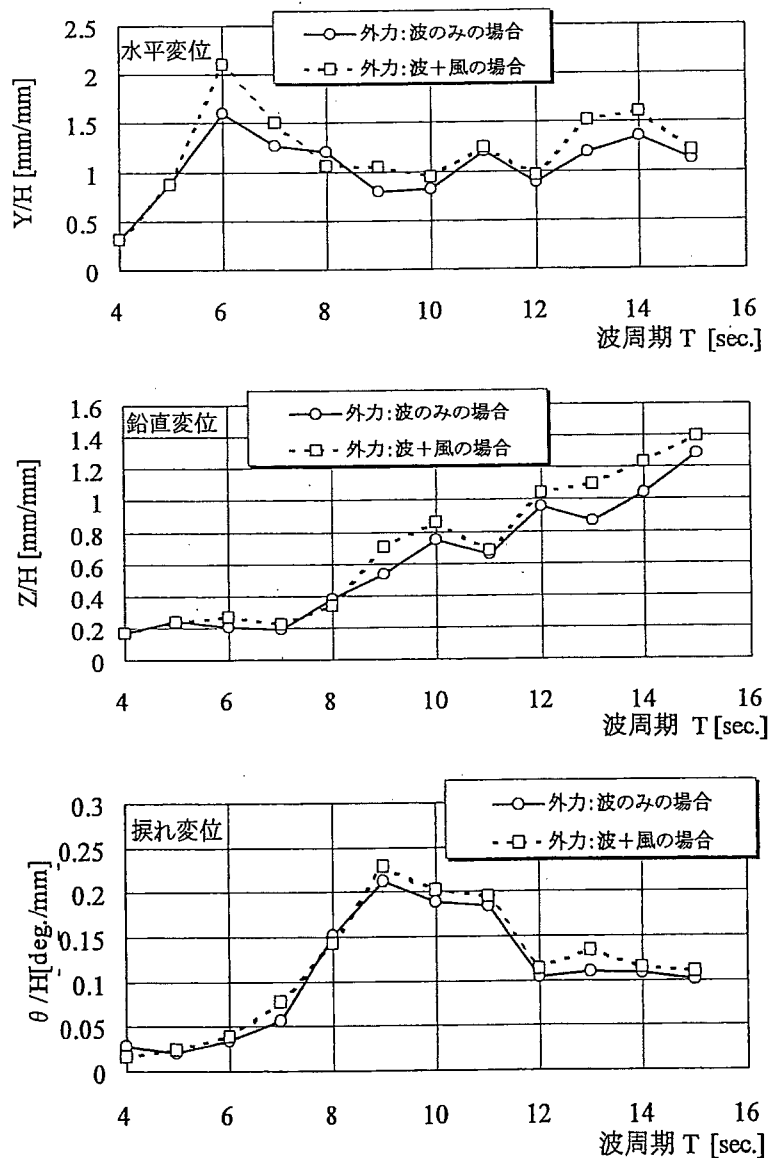


図-3.5.7 模型変位の周波数特性 (中央径間 $L/2$ 点)

3. 5. 3 実験値と解析値の比較

3. 3 で開発したメモリー効果を考慮できる時刻歴応答解析プログラムを使用し、外力が波単独の場合の解析を実施した。解析は浮体橋全体を剛体としてモデル化した場合と、弾性影響を考慮して浮体橋の桁部分を有限要素法による弾性梁要素でモデル化した場合を行った。また、ポンツーンと桁端部の係留はいずれも線形バネとしてモデル化し、ポンツーンに作用する流体力は水波 Green 関数を用いた境界要素法により算出した。

図-3.5.8 に中央径間 $L/2$ 点の各波周期に対する水平、鉛直、ねじれ変位の解析値と実験値の比較を示す。いずれの応答変位においても、剛体モデルより弾性影響を考慮した弾性モデルの方が、実験結果に近似していることがわかる。

以上より、今回開発した時刻歴応答解析プログラムの解析精度が確認され、浮体橋を設計する上で必要となる動揺量の推定に十分活用できることがわかった。

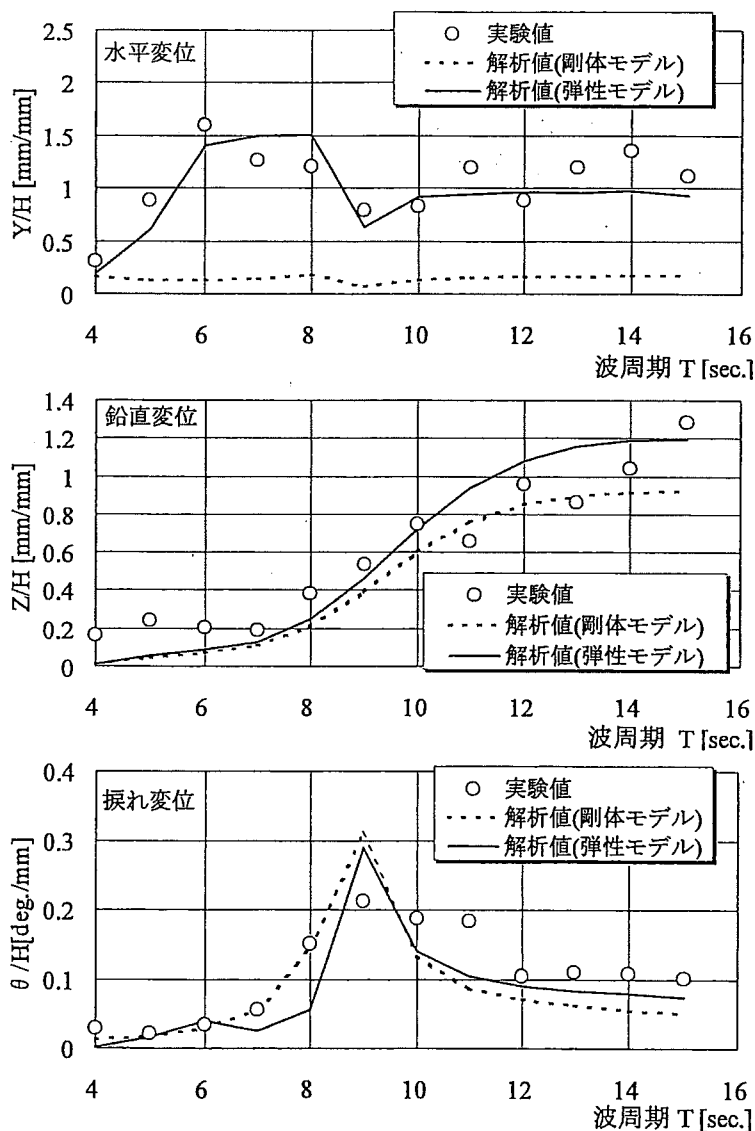


図-3.5.8 模型の応答変位における実験値と解析値の比較 (中央径間 $L/2$ 点)

3.6 動揺量推定プログラムの開発

本研究で開発した動揺量推定手法の実用化に向け、同手法に基づいた波浪と風による影響を同時に考慮できる動揺量推定プログラムを開発した。ここでは、開発したプログラムの概要を示す。

動揺量推定手法は、周波数応答解析（周波数領域の解析）および時刻歴応答解析（時間領域の解析）による方法の2つの手法である。両手法ともに、構造系の固有値解析を実施する必要がある。固有値解析では、汎用性プログラム NASTRAN を用いた。

3.6.1 システムの概要

開発したプログラムは、周波数応答解析と時刻歴応答解析を一つのプログラムに統合し、プログラム実行時において、解析手法を選択できるようにしている。プログラム実行時の初期画面を、図-3.6.1 に示す。また、図-3.6.2 に周波数応答解析プログラムのシステム概要を、図-3.6.3 に時刻歴応答解析プログラムのシステム概要をそれぞれ示した。

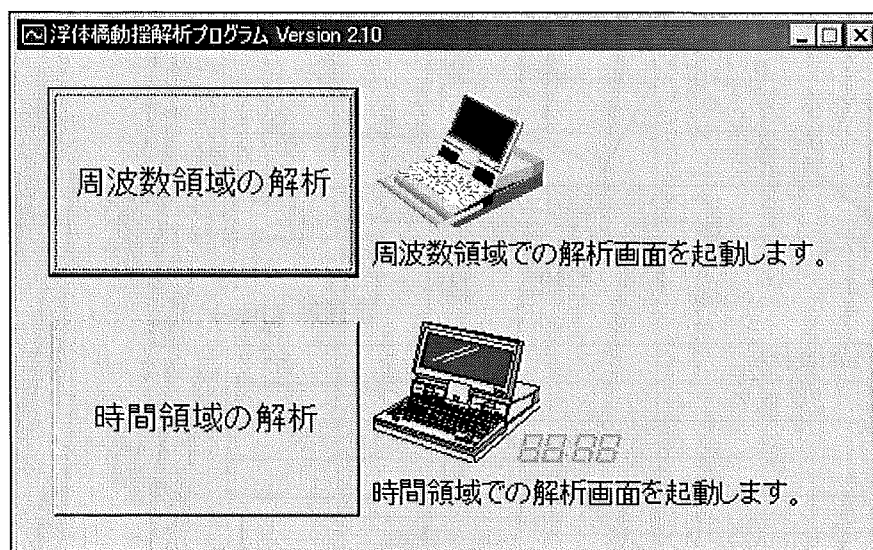
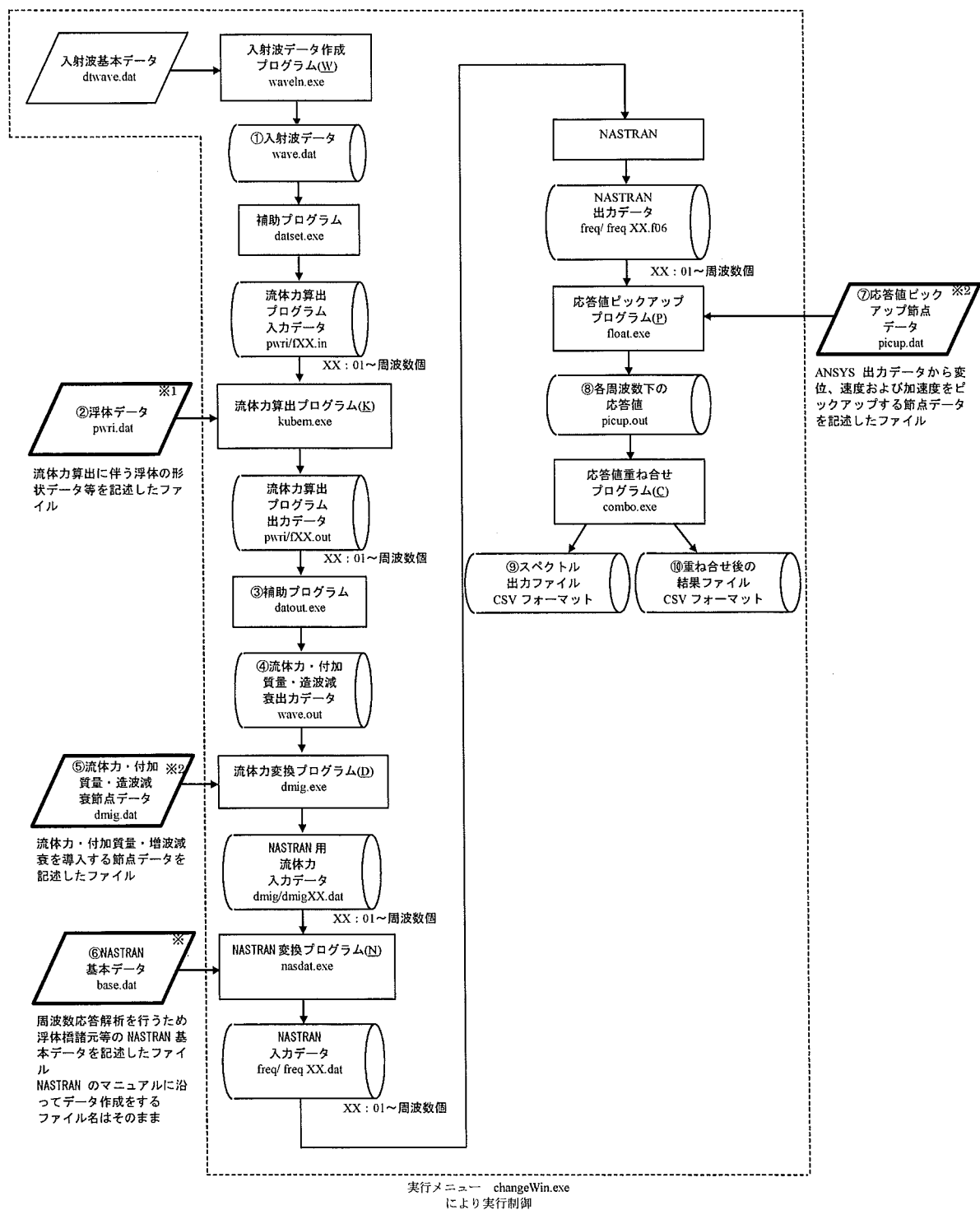


図-3.6.1 初期画面



※印のデータは別途作成する必要がある。

図-3.6.2 周波応答解析のシステムフローチャート

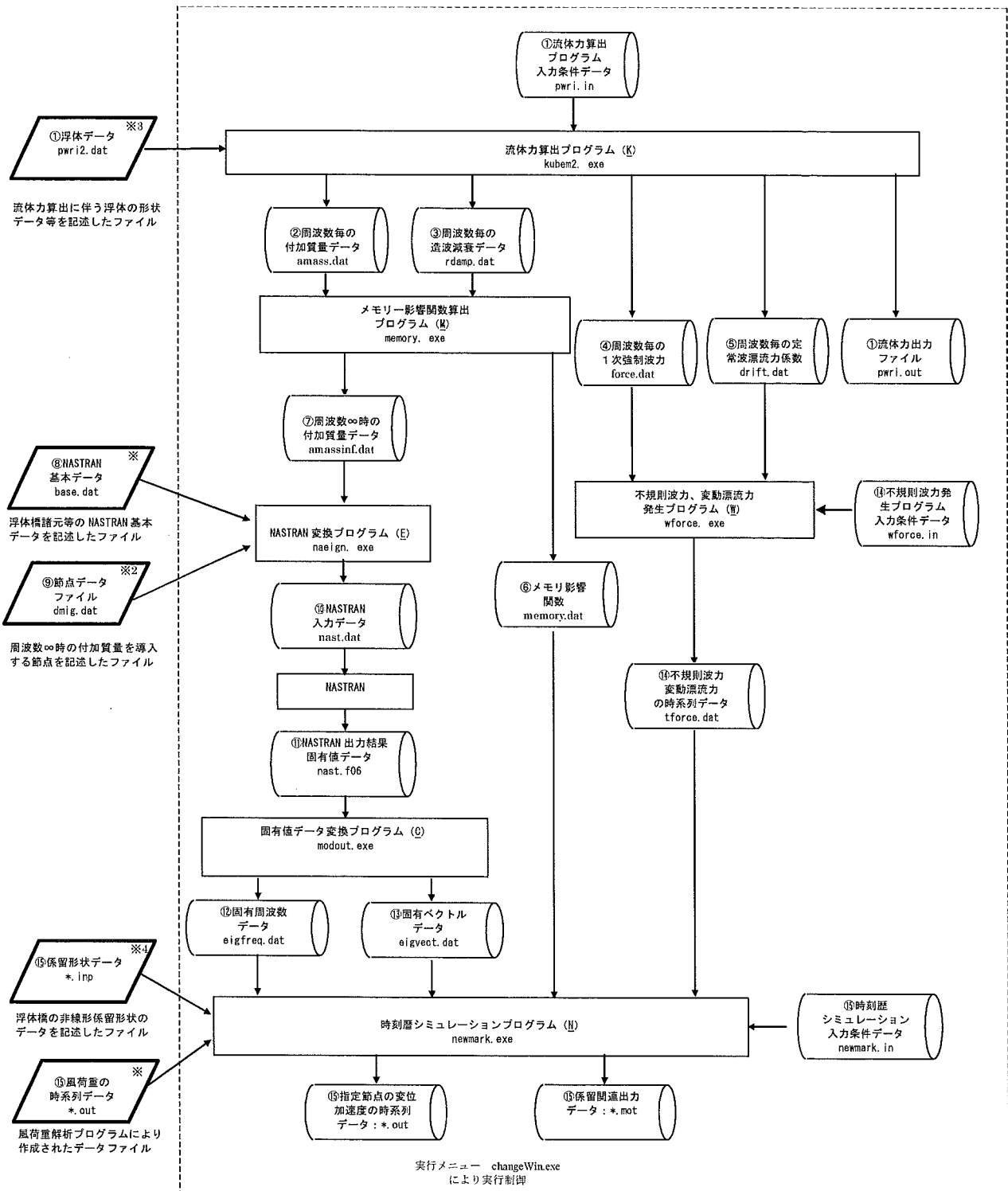


図-3.6.3 時刻歴応答解析のシステムフローチャート

3.6.2 周波数応答解析

(1) 解析画面とプログラム構成

初期画面より「周波数領域の解析」ボタンを選択すると、以下の解析画面が表示される。

図-3.6.4 周波数領域の解析画面

この実行メニューを用い、浮体橋動揺解析に必要なデータの入力や各プログラムの起動を行う。この実行メニューからは以下のプログラムが起動できる。

「入射波データ作成」、「流体力算出」、「流体力変換」、「NASTRAN 変換」、「NASTRAN」
「応答値ピックアップ」、「応答値重ね合せ」

(2) 入力データ

プログラム実行のためにあらかじめ準備しておく必要のある入力データファイルは、以下の4つのファイルであり、これら以外に必要なデータファイルは浮体橋動揺解析プログラム実行時に、実行メニュー (changeWin.exe) によって自動生成される。

- ① 流体力算出入力データファイル「pwri.dat」 : 流体力算出プログラムで必要
 - ② 節点データファイル「dmig.dat」 : 流体力変換プログラムで必要
 - ③ NASTRAN 基本データファイル「base.dat」 : NASTRAN で必要
 - ④ ピックアップ節点データファイル「picup.dat」 : 応答値ピックアッププログラムで必要
- 以下に、各プログラムの実行で必要な図-3.6.4 のデータ入力欄の概要を示す。なお、ファイ

ル名の後の（ ）は、図-3.6.2 のシステムフローチャートで示したファイル名である。

1) 入射波設定データ

流体力を算出するための条件と出力ファイル名を指定する。指定項目は以下のとおりである。

【入射波データ出力ファイル名】(wave.dat)

【水深 (m)】

【入射波の方向 (度)】

【周波数の範囲 (Hz)】

2) 流体力算出用入力データ (浮体データ) ファイル名 (pwri.dat)

流体力算出用入力データファイル名を指定する。

3) 形状データの橋軸方向

浮体データの形状の橋軸方向は常に X 方向に設定している。

4) 流体力・付加質量・増波減衰ファイル名 (wave.out)

プログラムによって作成される「流体力・付加質量・増波減衰ファイル名」を指定する。

5) 節点データファイル名 (dmig.dat)

流体力・付加質量・増波減衰を導入する節点データを入力したファイル名を指定する。

6) NASTRAN 基本データファイル名 (base.dat)

NASTRAN 基本データファイル名を指定する。

7) 応答値ピックアップ節点データファイル名 (picup.dat)

応答値ピックアップ節点データファイル名を指定する。

8) 応答値ピックアップ出力ファイル名 (picup.out)

応答値ピックアップ出力ファイル名を指定する。

9) スペクトル設定データ

スペクトル算出に必要な有義波 (H1/3、T1/3) と計算周波数の範囲を設定する。

10) 応答値重ね合せ出力用 CSV ファイル名

重ね合せ後の値を出力するためのファイル名を指定する。

3.6.3 時刻歴応答解析

(1) 解析画面とプログラム構成

初期画面より「時間領域の解析」ボタンを選択すると、以下の解析画面が表示される。この実行メニューを用い、浮体橋動揺解析に必要なデータの入力や各プログラムの起動を行う。この実行メニューからは以下のプログラムが起動できる。

「流体力算出」、「メモリー影響関数算出」、「NASTRAN 変換」、「NASTRAN」

「固有値データ変換」、「不規則波力発生」、「時刻歴シミュレーション」

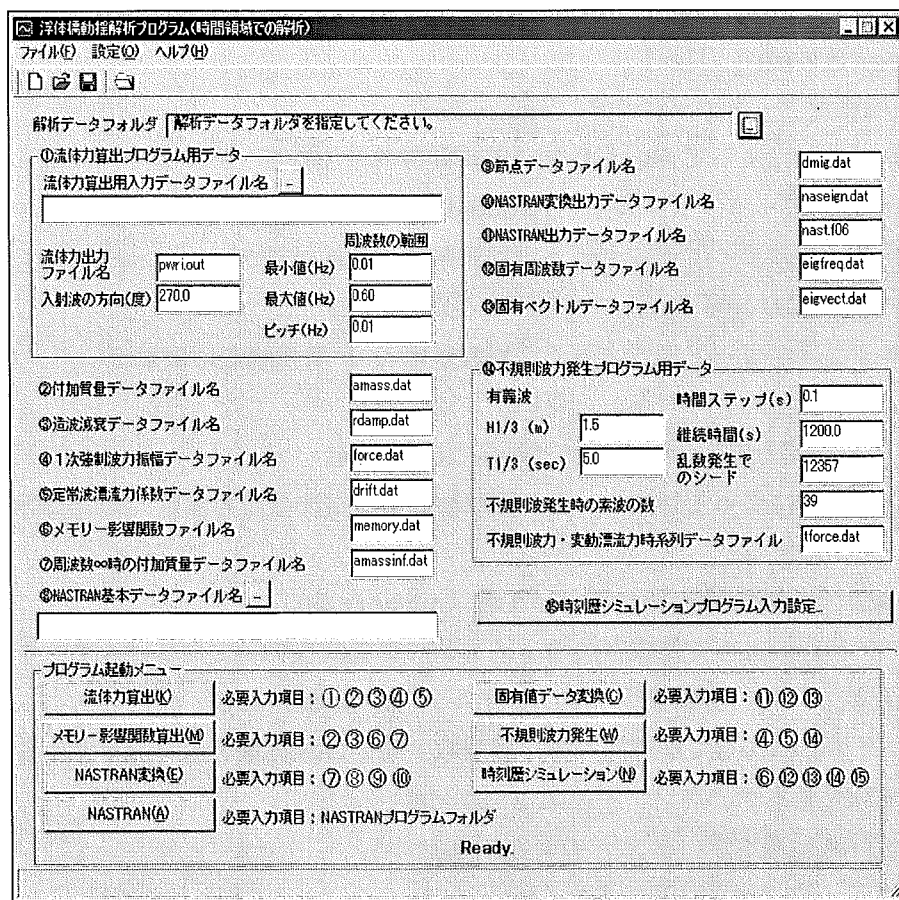


図-3.6.5 時間領域の解析画面

(2) 入力データ

プログラム実行のためにあらかじめ準備しておく必要のある入力データファイルは、以下の4つのファイルであり、これら以外に必要なデータファイルは浮体橋動揺解析プログラム実行時に、実行メニュー (changeWin.exe) によって自動生成される。

- ① 流体力算出用入力データファイル「pwri2.dat」 : 流体力算出プログラムで必要
- ② 節点データファイル「dmig.dat」 : NASTRAN 変換プログラムで必要
- ③ NASTRAN 基本データファイル「base.dat」 : NASTRAN で必要
- ④ 係留形状データファイル「nlinear.inp」 : 時刻歴シミュレーションで必要
- ⑤ 風荷重データファイル「wind¥wind07-1.out 等」 : 時刻歴シミュレーションで必要

以下に、図-3.6.5 の各モジュールの実行に必要な入力欄の概要を示す。なお、ファイル名の後の () は、図-3.6.3 のシステムフローチャートで示したファイル名である。

1) 流体力算出プログラム用設定データ

流体力を算出するための条件と出力ファイル名を指定する。指定項目は以下のとおりである。

【流体力算出用入力データ (浮体データ) ファイル名】 (pwri2.dat)

【流体力出力ファイル名】

【入射波の方向 (度)】

【周波数の範囲 (Hz)】

2) 付加質量データファイル名 (amass.dat)

プログラムによって作成される「周波数毎の付加質量データファイル名」を指定する。

3) 造波減衰データファイル名 (rdamp.dat)

プログラムによって作成される「周波数毎の造波減衰データファイル名」を指定する。

4) 1 次強制波力振幅データファイル名 (force.dat)

プログラムによって作成される「周波数毎の 1 次強制波力振幅データファイル名」を指定する。

5) 定常波漂流力係数データファイル名 (drift.dat)

プログラムによって作成される「周波数毎の定常波漂流力係数 (動揺抑制時) データファイル名」を指定する。

6) メモリー影響関数データファイル名 (memory.dat)

プログラムによって作成される「メモリー影響関数データファイル名」を指定する。

7) 周波数 ∞ 時の付加質量データファイル名 (amassinf.dat)

プログラムによって作成される「周波数 ∞ 時の付加質量データファイル名」を指定する。

8) NASTRAN 基本データファイル名 (base.dat)

NASTRAN 基本データファイル名を指定する。

9) 節点データファイル名 (dmig.dat)

周波数 ∞ 時の付加質量を導入する節点データを入力したファイル名を指定する。

10) NASTRAN 変換出力データファイル名 (nast.dat)

NASTRAN 変換プログラムの出力ファイル名を指定する。

11) NASTRAN 出力データファイル名 (nast.f06)

NASTRAN 実行時の出力ファイル名を指定する。

12) 固有周波数データファイル名 (eigfreq.dat)

固有値データ変換プログラムによって NASTRAN 実行時の出力ファイルから固有周波数データを出力する。出力する「固有周波数データファイル名」を指定する。

13) 固有ベクトルデータファイル名 (eigfreq.dat)

固有値データ変換プログラムによって NASTRAN 実行時の出力ファイルから固有ベクトルデータを出力する。出力する「固有ベクトルデータファイル名」を指定する。

14) 不規則波力発生プログラム用データ (考慮する外力が風荷重のみの場合、指定不要)

不規則波の発生に必要な以下の条件を指定する。

【有義波】

【時間ステップ (s)、経続時間 (s)、乱数発生でのシード】

【不規則波発生時の素波の数】

【不規則波力・変動漂流力時系列データファイル名】

15) 時刻歴シミュレーションプログラム入力設定

「時刻歴シミュレーションプログラム入力設定...」ボタンをクリックすると、以下のダイアログが表示され、時刻歴シミュレーションプログラムに必要な入力値を設定する。

時刻歴シミュレーションプログラム用データ

時間ステップ dt (s)

終了時間 (s)

浮体基礎節点数 N

浮体基礎節点番号 (カンマ区切り) N個

解析時に考慮する外力

- ☒ 不規則波力・変動漂流力 + 風荷重
- ☐ 不規則波力・変動漂流力のみ
- ☐ 風荷重のみ

非線形係留バネの取り付く節点数 Nr

非線形係留バネの取り付く節点番号 (カンマ区切り) Nr 個

係留形状データファイル名 (inp) (mot)

結果出力ファイル名

出力する節点の数 Nu

出力する節点番号 (カンマ区切り) Nu 個

主桁用風荷重ファイル名

追加

削除

橋脚用風荷重ファイル名

橋脚1本当たりの節点数

OK キャンセル

16) 風荷重に関するデータ

解析時に考慮する外力が、「不規則波力・変動漂流力 + 風荷重」または「風荷重のみ」の場合に、以下の入力欄を用いて、主桁と橋脚のに作用させる風荷重ファイルを指定する。

主桁用風荷重ファイル名

追加

削除

E:\CaseTime\wind\wind07-1.out
E:\CaseTime\wind\wind07-14.out
E:\CaseTime\wind\wind07-2.out
E:\CaseTime\wind\wind07-3.out

橋脚用風荷重ファイル名

橋脚1本当たりの節点数

【参考文献（3章）】

- 1)合田良實：港湾構造物の耐波設計、鹿島出版会、1997
- 2)社団法人 土木学会：浮体橋の設計指針（案）、2002
- 3)高木又男、新井信一：船舶。海洋構造物の耐波理論、成山堂、pp567-575、1996
- 4)遠藤久芳、矢後清和：動荷重を受ける大型浮体の時刻歴応答、日本船舶学会論文集、第 186 号、pp369-376、1999
- 5)戸川隼人：有限要素法による振動解析、サイエンス社、pp28-102、1975
- 6)財団法人 沿岸開発技術研究センター：浮体構造物技術マニュアル、1991

4 浮体橋の適用性の検討

4.1 概要

本章では、分離ポンツーン型の多径間連続桁を有する浮体橋を対象として我が国沿岸部における浮体橋の適用可能性について検討を行った。浮体橋は水の浮力を利用した構造であり基礎構造が無いのが特徴である。そのため、従来橋梁に比べ経済的となる可能性がある反面、波浪による動揺により車輛の走行安定性に問題が生じる可能性がある。このことから、①動揺に対する車輛の走行安定性に着目した検討、②従来橋梁との概算工事費の比較による経済性検討、を実施し浮体橋の適用可能性を検討した。

①の検討では、我が国の海洋沿岸部における波浪観測データに基づき、3章で示した動揺量推定プログラムを使用した動揺解析を実施した。

②の検討では、水深をパラメータとし、従来橋と浮体橋の概算工費の比較を行った。

4.2 動揺に着目した適用性検討

4.2.1 検討方法

浮体橋に特有の要求性能として、波浪による動揺に対する走行性及び構造体としての安全性が挙げられる。浮体橋を計画・設計する上で、まず、道路としての機能（車両を安全に通行させる）が確保される必要がある。

そこで、我が国の沿岸部における波浪条件に対して、車両の走行安全性の観点から動揺に対する照査を行い浮体橋の適用性について評価することとした。

検討の手順（検討フロー図）を図-4.2.1に示す。手順の各項目の内容は次のとおりである。

【Ⅰ. 検討条件の設定】

①照査に用いる指標と許容値の設定

車両の走行安定性の照査に用いる工学的指標とそれに対する許容値を設定する。

②全国の観測有義波の整理

港湾技研資料から日本沿岸部で観測された有義波諸元（有義波高 $H_{1/3}$ 、有義周期 $T_{1/3}$ ）を整理する。

③供用時有義波の設定

検討の対象となる供用時波浪の有義波を設定する。

【Ⅱ. 周波数応答解析による一次選定】

全国の波浪観測地点を対象に、3章で示した周波数応答解析による動揺量推定プログラムを用いた動揺解析により、適用性の概略な検討を実施する。これにより、時刻歴応答解析を用いた詳細な検討を実施する地点を抽出する。

④有義波諸元を変数としたパラメータ解析

有義波諸元（有義波高 $H_{1/3}$ 、有義周期 $T_{1/3}$ ）をパラメータとして、動揺量を算出する。

⑤要求性能を満足する有義波の選定

④で算出した動揺量が、許容値を超えない有義波を選定する。

⑥適用性判定・適用可能地点の一次選定

⑤で選定した有義波と全国で観測された有義波を比較し、浮体橋の適用性を評価する。

【Ⅲ．時刻歴応答解析による二次選定】

Ⅱで選定された適用可能地点に対して、3 章で示した時刻歴応答解析による動揺量推定プログラムを用いた動揺解析により、適用性の詳細な検討を実施する。

⑦時刻歴応答解析

②で整理した検討対象地点の有義波を用いて、係留系の非線形復元力特性を考慮した時刻歴応答解析を行う。

⑧適用性の判定

解析で算出された上部工位置における応答加速度から、浮体橋の適用性を評価する。

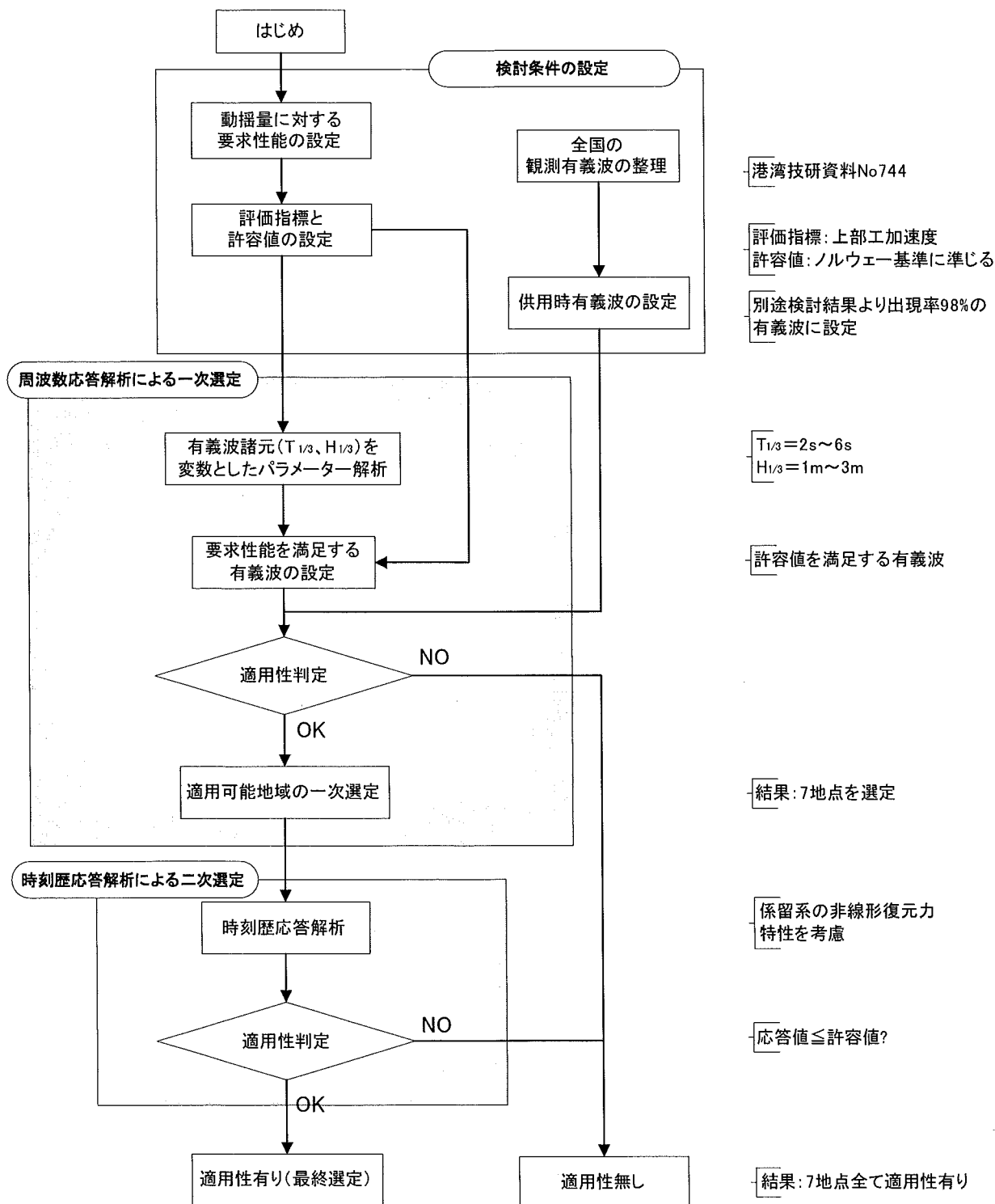


図-4.2.1 動揺量に着目した検討フロー

4.2.2 動揺量の照査に用いる評価指標と許容値

走行安定性に対する要求性能の照査に用いる工学的指標としては、海外の浮体橋の設計において、これまで一般的に用いられている上部構造位置における応答加速度（水平、鉛直、回転方向）を用いることにした。応答加速度の許容値については、ノルウェーの設計基準を準用して以下のとおりに設定した。

水平・鉛直方向：0.6m/s² 回転方向：2.0deg/s²

4.2.3 検討条件

(1) 検討モデル

1) 基本条件

検討の対象とする橋梁は、浮体橋が主要重交通路線に架橋されることを想定し、全 6 車線の自動車専用道とした。上部構造は標準支間が 100m の 9 径間連続鋼床版箱桁橋とし、水平方向の変位を抑制する目的で橋軸方向中央部（約 500m 間隔）にフェンダー係留を設置するとともに、各ポンツーンにはカテナリー係留（チェーン係留）を設置し水平方向を支持する。

橋脚は鋼製門型ラーメン橋脚とし、主な船舶が航行可能である 25m 程度の桁下空間を確保できるように、ポンツーン寸法を考慮して橋脚高さを 20m とした。支承形式は、桁の温度変化による伸縮が拘束を受けないことを考慮し全支点ともに固定支承とした。

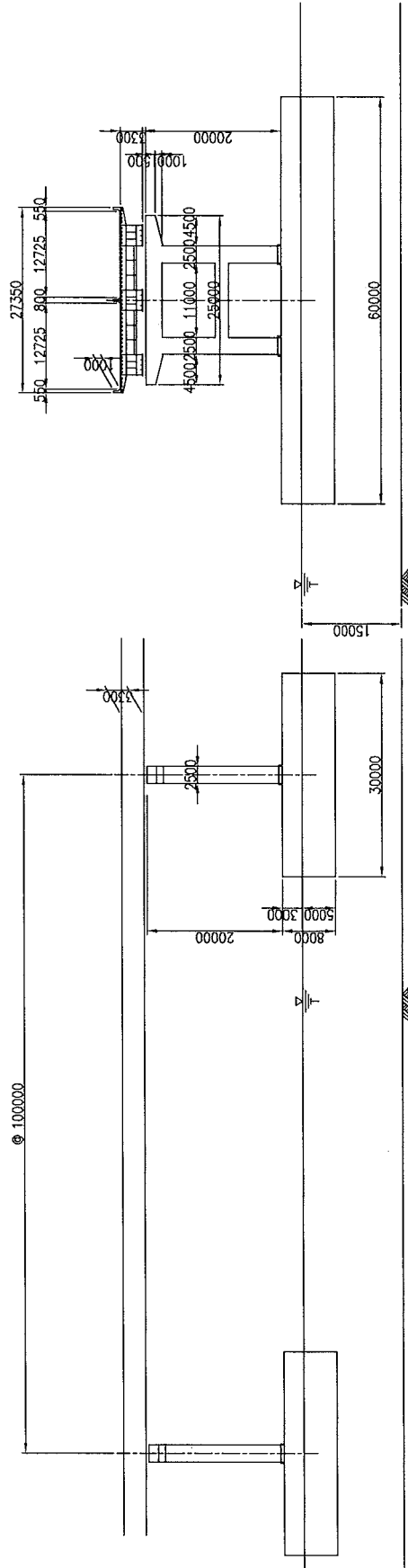
基本条件を表－4.2.1 に、橋梁一般図を図－4.2.2 にそれぞれ示す。

表－4.2.1 基本条件

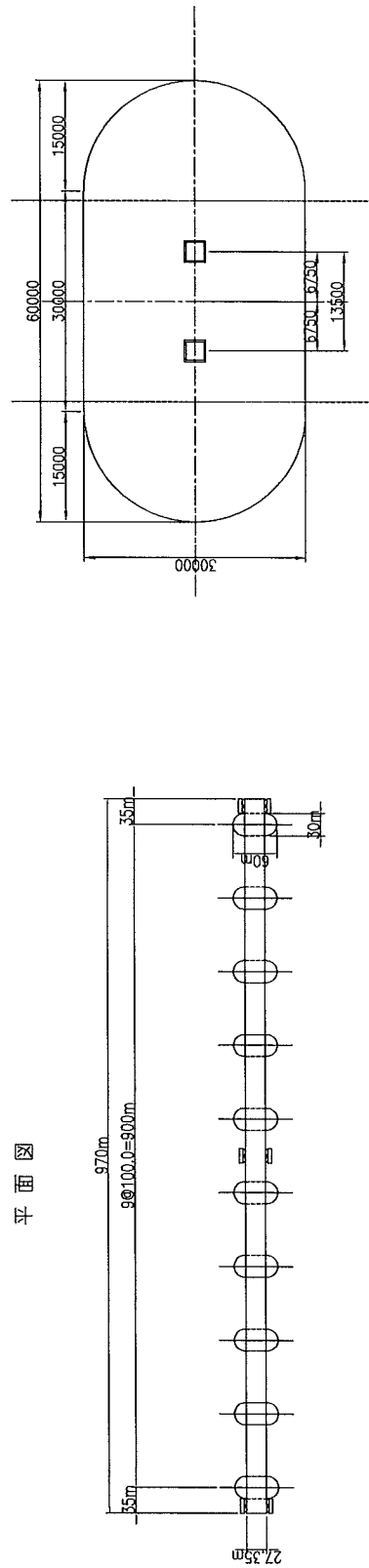
橋梁形式	9 径間連続鋼床版箱桁橋
橋長	970m (35.0+9@100.0+35.0m)
桁高	3300mm
床版形式	鋼床版
舗装	アスファルト舗装 t=80mm
平面線形	R=∞
斜角	90°
活荷重	B 活荷重

側面図

断面図



平面図



特記なき寸法の単位は mm

図-4.2.2 対象とした橋梁一般図

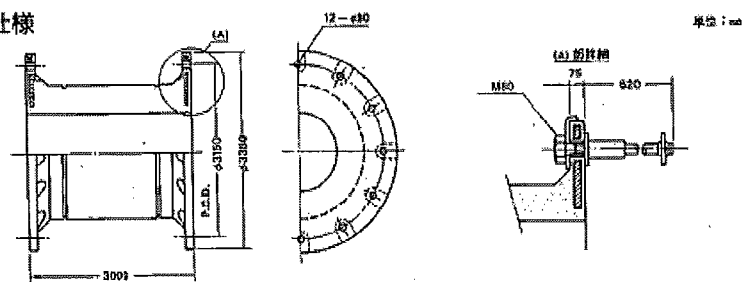
2) 係留施設

対象橋梁の係留形式は、フェンダー係留およびカテナリー係留（チェーン係留）とした。概要を以下に示す。

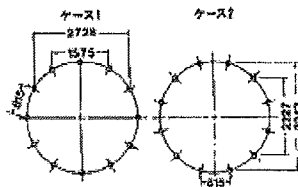
①フェンダー係留

フェンダー係留は、橋梁端部と橋梁センターの位置（P5～P6 間）に設置する（設置間隔 2 @467.5m）。フェンダーには、C3000RH クラス（ゴム厚 3000mm）の防舷材を使用し、橋梁の左右にそれぞれ 2 個/箇所を設置する（合計 4 個/箇所）。材料特性を図-4.2.3 に示す。

図仕様



図ボルト穴の位置



図性能表

ゴムNo	反力 (ton)		吸収エネルギー (ton-m)	
	設計標準値	設計限界値	設計標準値	設計限界値
RE	—	—	—	—
RS	—	—	—	—
RH	578.2	814.6	745.8	806.8
RO	444.7	472.7	573.6	620.6
R1	378.0	401.8	467.6	527.5

設計標準値：82.1%
設計限界値：60%
総公差：±10%

図性能曲線

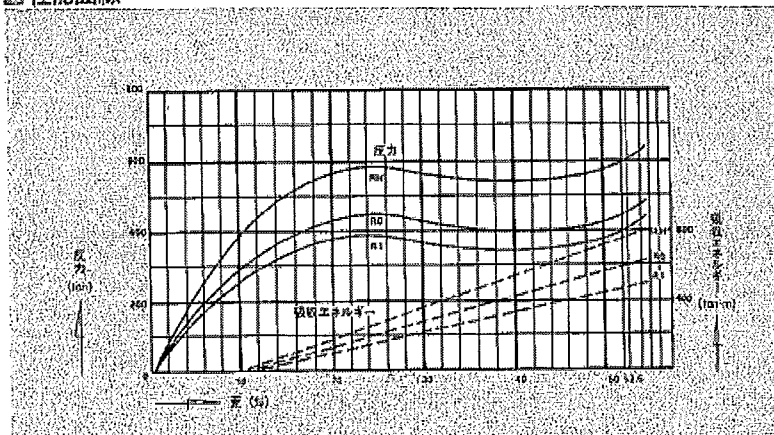
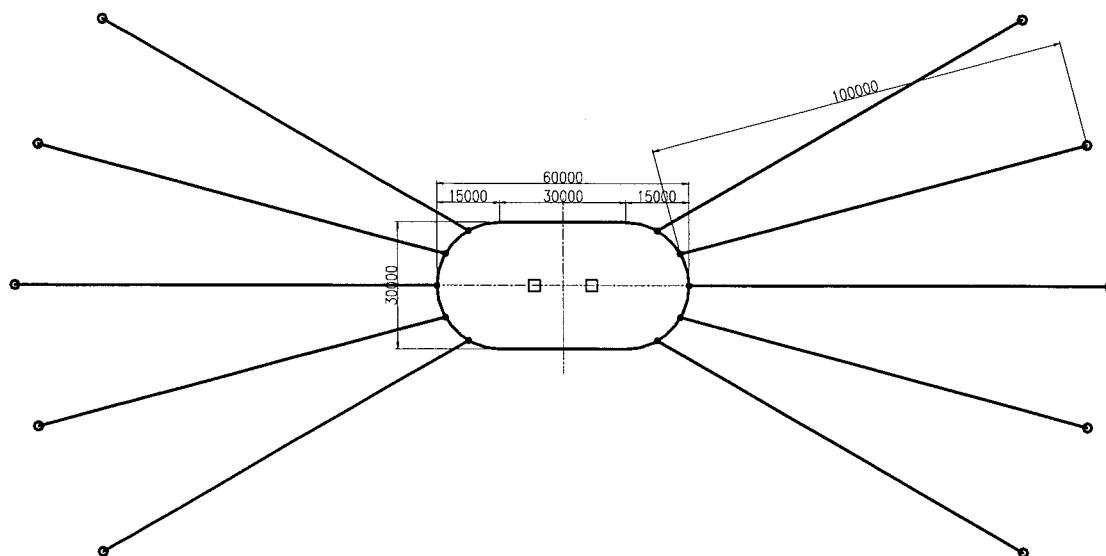


図-4.2.3 フェンダーの材料特性

②カテナリー係留

ポンツーンに取り付けるチェーン（カテナリー）は、図－4.2.4 に示すように、ポンツーン 1 基あたり 10 本とし、チェーン長さを 100m とした。

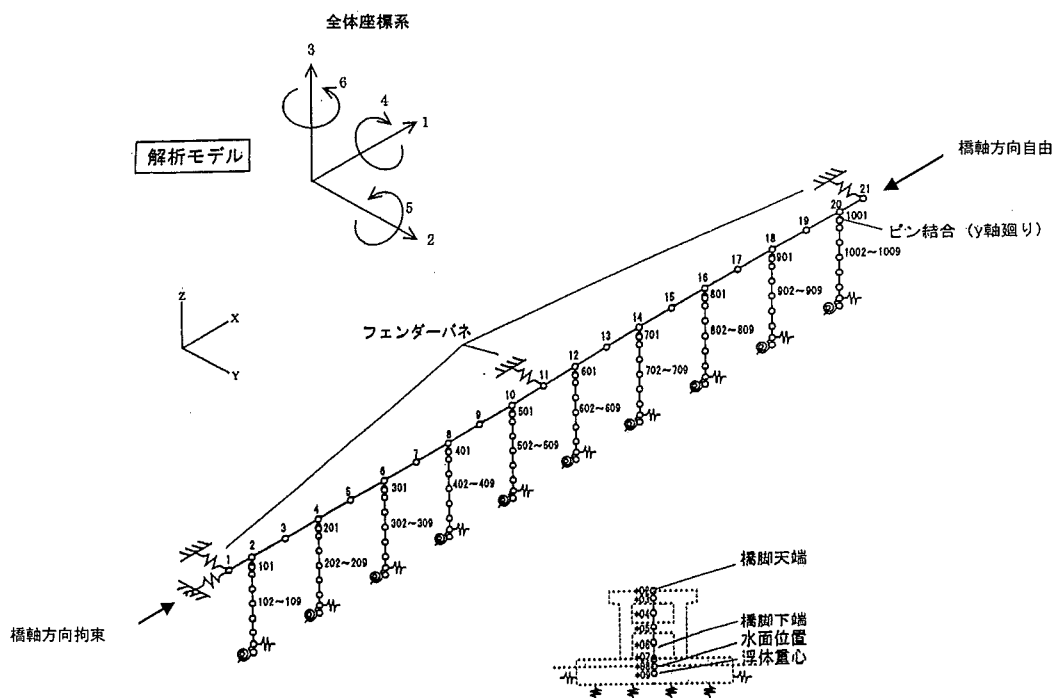


図－4.2.4 カテナリー係留（チェーン係留）の概要図

3) 解析モデル

i) 骨組みモデル

解析に用いた骨組みモデルを、図－4.2.5 に示す。



図－4.2.5 骨組みモデル

ii) 係留バネ

一次選定では、周波数応答解析を用いるため係留系の復元力特性を線形として扱う必要がある。そのため、復元力特性の等価線形バネ値を算出した。なお、二次選定においては、係留系の復元力特性を非線形として取り扱った（4.2.5 参照）。

等価線形バネ値は、風荷重作用時の各係留の分担力と復元力特性から算出される等価剛性とし、以下に算出結果を示す。

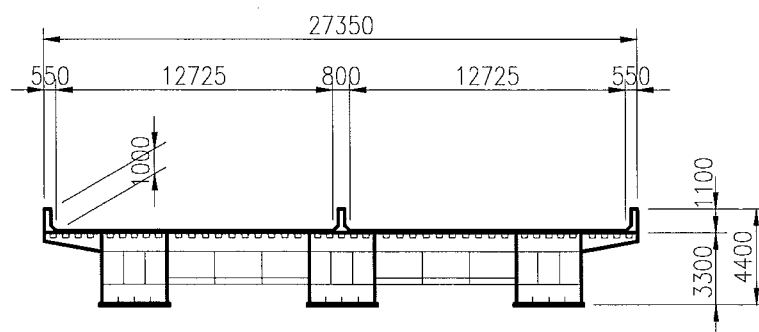
①風荷重の算出

風荷重は道路橋示方書にしたがい設定した。

●上部構造：

$1 \leq B/D = 6.21 < 8$ であるため、

$$w = (4.0 - 0.2 \times B/D) = 2.76 \text{ kN/m}^2$$



●下部構造： $w = 3.0 \text{ kN/m}^2$ （道路橋示方書より）

●ポンツーン： $w = 1.5 \text{ kN/m}^2$ （小判型）（道路橋示方書より）

以上から、橋脚 1 基あたりの風荷重は、次のとおりとなる。

	kN/m ²		幅		高さ	
上部構造	: 2.76	×	100.0	×	4.40	= 1214 kN
下部構造	: 3.00	×	2.50	×	20.00	= 150 kN
ポンツーン	: 1.50	×	30.0	×	3.00	= 135 kN
						1499 kN

②係留系の分担荷重

①の風荷重に対して、3 箇所に配置したフェンダー（C3000RH）が 2.0%（ゴム厚 3m × 2% = 0.06m）ひずむと仮定し、係留系の分担荷重を算出した。

フェンダー（C3000RH）1 個あたりの初期剛性は、図-4.2.6 および表- 4.2.2 より、

13720kN/m (=1029kN/0.075m : 圧縮時の 2 点目) である。風荷重に対して 6 個 (2 個/片側/箇所×3 箇所) のフェンダーで受け持つため、フェンダーの分担荷重は次のとおり算出される。

$$R(\text{fender}) = 6 \text{ 個} \times 0.06\text{m} \times 13720 \text{ kN/m} = 4939\text{kN}$$

対象橋梁全体に作用する風荷重は、

$$1499\text{kN/基} \times 10 \text{ 基} = 14990\text{kN}$$

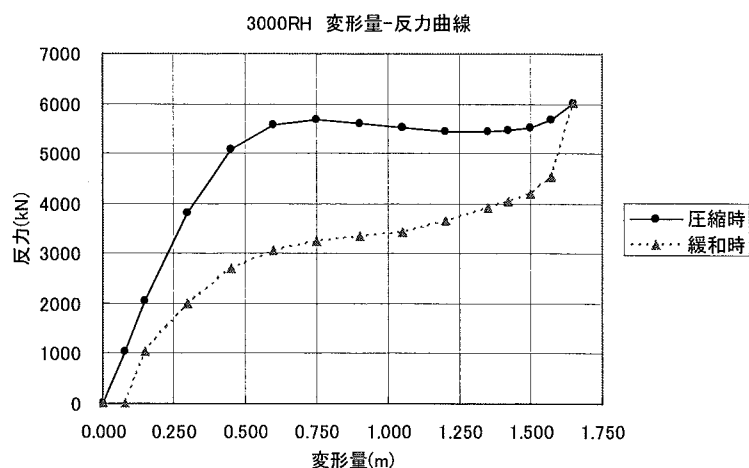
であるため、カテナリー係留の分担荷重は、

$$R(\text{catenary}) = 14990 - 4939 = 10051\text{kN}$$

よって、ポンツーン 1 基あたりのカテナリーの分担荷重は、次のとおりとなる。

$$r(\text{catenary}) = 10051/10 = 1005\text{kN} \rightarrow 1000\text{kN}$$

表-4.2.2 フェンダー (R3000CH) の復元力



特性

圧縮時		緩和時	
変形量(m)	反力(kN)	変形量(m)	反力(kN)
0.000	0	0.000	0
0.075	1029	0.075	0
0.150	2058	0.150	1029
0.300	3816	0.300	1985
0.450	5086	0.450	2699
0.600	5574	0.600	3062
0.750	5670	0.750	3238
0.900	5603	0.900	3357
1.050	5511	1.050	3414
1.200	5454	1.200	3663
1.350	5454	1.350	3918
1.425	5483	1.425	4054
1.500	5511	1.500	4190
1.575	5670	1.575	4537
1.650	6027	1.650	6027

図-4.2.6 フェンダー (R3000CH) の復元力特性

③バネ値

フェンダー係留 : $13720\text{kN/m} \times 2 \text{ 個/片側/箇所} = 27440 \text{ kN/m} \rightarrow 27500 \text{ kN/m}$

カテナリー係留 : 図- 4.2.7 より、1450 kN/m

荷重H (kN)	変位 δ (m)	等価剛性 (kN/m ²)
0	0.0	—
122	0.1	1219
246	0.2	1232
376	0.3	1252
512	0.4	1281
660	0.5	1320
822	0.6	1370
1003	0.7	1433
1210	0.8	1512
1448	0.9	1609
1729	1.0	1729
2066	1.1	1878
2505	1.2	2087
3263	1.3	2510

*チェーンφ88.9、初期水平力 $H_0=150\text{kN}$
チェーン長 $L=100\text{m}$

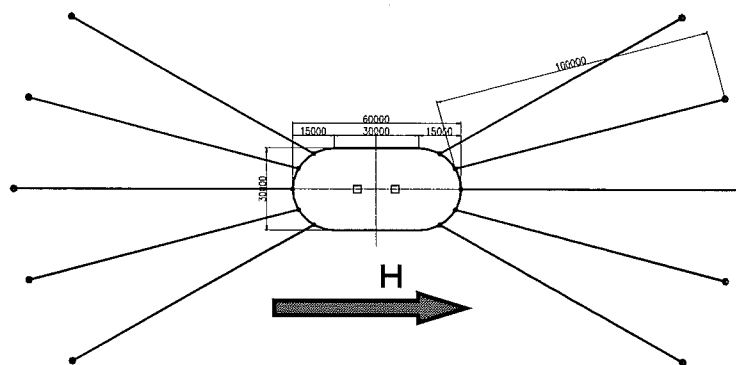
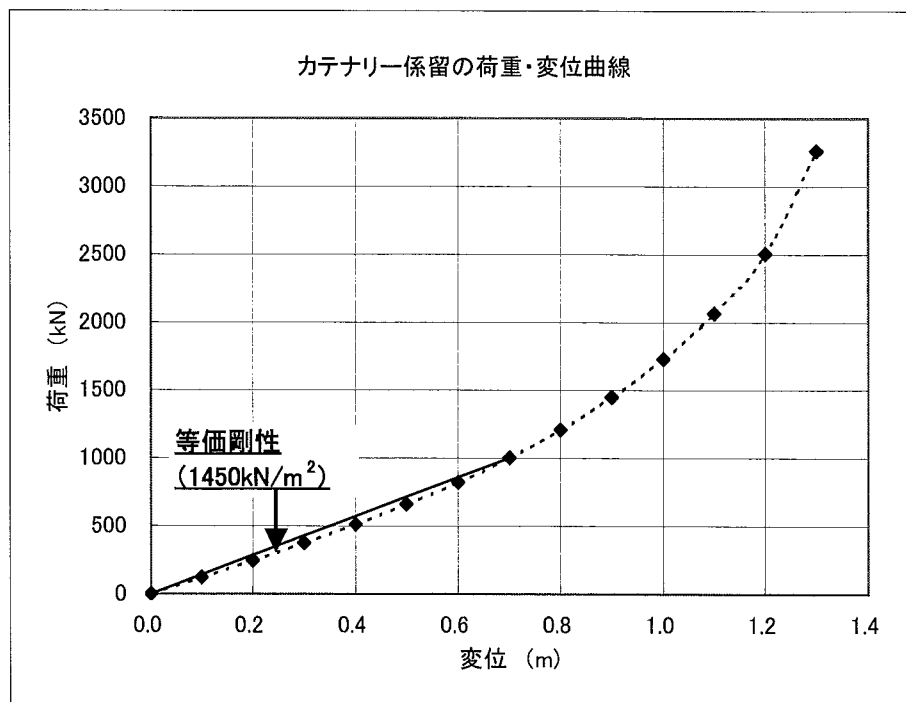


図-4.2.7 カテナリー係留の係留バネ

(2) 波浪条件の設定

1) 設定方法

供用時の波浪は、強風による交通規制が不要な状態での波浪と考えた。架橋位置の同時刻における強風および波浪の観測データがある場合には、風と波浪の相関関係から供用時の波浪条件を設定することが可能である。また、架橋位置周辺の地形や気象条件を考慮して、交通規制時の風が吹いている状態での波浪条件を、実験や解析によるシミュレーションを実施し設定することも可能である。いずれの場合にも、まず架橋位置における風と波浪の相関性を定量的に把握することが必要であり、そのためには、特定の架橋位置における詳細な風や波浪の観測データをはじめとする気象情報、地理情報が必要である。本検討では特定の位置に限定したものではなく、さらに現時点ではこのようなデータや情報がないことから、以下に述べる簡易的な手法により供用時波浪条件を設定することとした。

【供用時波浪条件設定（図－4.2.8）】

- ① 検討に用いる供用時波浪は、最大風速 23m/s の時に発生している波浪を想定する。
- ② 風速観測データから、最大風速 23m/s を超える日数を算出する。
- ③ ②の日数を観測全日数で除して、暴風時の出現率（＝最大風速 23m/s を超える出現率）を算出し、これを暴風時波浪の出現率とみなす。
- ④ 全波浪出現率（100%）から③を減じ、供用時波浪の出現率とする（図－4.2.9）。
- ⑤ ④で算出した出現率を供用時波浪の非超過確率とし、この非超過確率に相当する波浪条件を波浪観測データから算出し、検討用波浪条件とする。

交通規制時の風速は各道路管理者によって定められており、風速 20～25m/s で交通規制を実施しているところが多い¹⁾。一方、これまで強風による車輛の交通事故として、最大風速 23m/s でトラックが横転した事例が報告されている²⁾。そこで、本検討では、トラックの横転事例を参考とし、供用時の最大風速 23m/s に設定した。

波浪の観測データは、港湾技研資料でまとめられている。本データは、台風や暴風時などの全データが含まれているが、風速との対応は示されていないことから、本データより供用時の波浪のみを抽出することはできない。一方、風の観測データは、気象庁によりまとめられている。ここでは、波浪と風との相関性は大きいものと考え、風の観測データから供用時風速（ $V \leq 23\text{m/s}$ ）の非超過確率を算出し、これを供用時波浪の非超過確率とみなし、波浪観測データの統計処理により供用時波浪条件を設定することとした。

【波浪データおよび風速データ】

波浪観測データ：港湾技研資料 744 号（1993 年）

風速観測データ：気象庁電子閲覧室 (<http://www.data.kishou.go.jp/>)

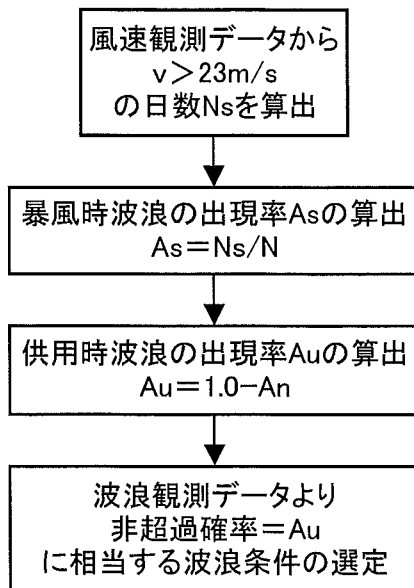


図-4.2.8 供用時波浪の設定フロー

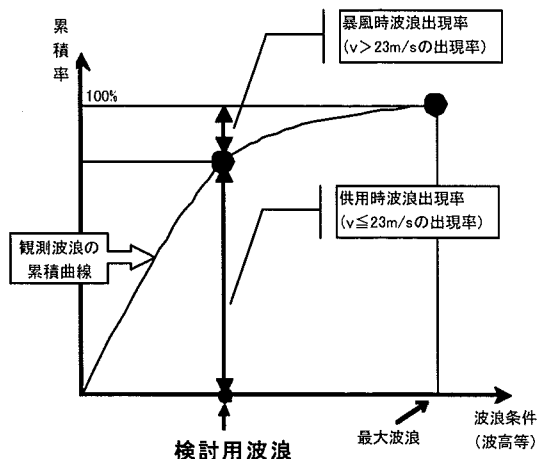


図-4.2.9 観測波浪の累積率と供用時波浪

2) 波浪観測データと風速観測データの整理

港湾技研資料から取得した波浪観測データを整理した結果を巻末資料2に添付した。また、気象庁電子閲覧室から取得した風速観測データを表-4.2.3に示した。なお、風速観測データは最終的に適用可能性を有するものと判定された7地点（太平洋沿岸部を中心に、観測有義波の波高が比較的小さい地点）について整理した。

3) 供用時波浪の設定

表-4.2.3から、暴風時 ($V > 23\text{m/s}$) の日数は6地点の平均で9日/年となった。なお、石廊崎では、他の6地点と比べ暴風時の日数が極端に多いため、このデータを除外した。以上から、供用時波浪出現率は次のように算出される。

$$\text{暴風時波浪出現率 } A_s = 9 \text{ 日} / 365 \text{ 日/年} = 0.025$$

$$\text{供用時波浪出現率 } A_u = 1.00 - 0.025 = 0.975 \rightarrow 0.98 \text{ (98\%)}$$

よって、非超過確率98%に相当する波浪を検討用波浪とした。

なお、検討に用いる有義波高 $H_{1/3}$ は、図-4.2.10に示す方法で算出した。また、有義周期 $T_{1/3}$ は、浅海で風域内の波において統計的に成立する下式²⁾を用いて算出した。

$$T_{1/3} = 3.86 \cdot \sqrt{H_{1/3}}$$

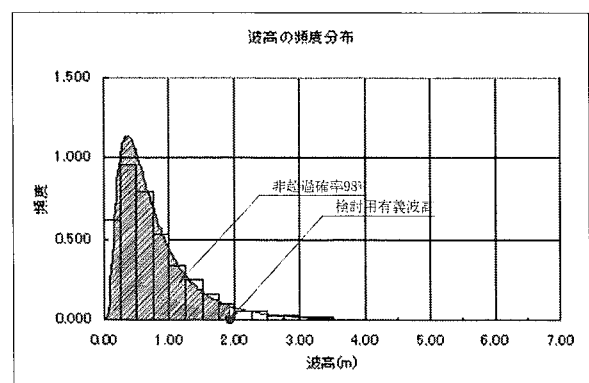


図-4.2.10 検討用有義波高の設定

表-4.2.3 過去10年間の波浪観測地における風速V >23m/s の日数

波浪観測地 風速観測地	宮古 宮古	浜金谷 館山	下田 石廊崎	神戸 神戸	志布志 油津	伊王島 長崎	藍島 下関	備考
1993	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 Σ	1 0 1 2 1 0 1 0 0 0 2 1 Σ	1 13 4 3 1 0 2 1 0 6 4 1 50 Σ	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 8 Σ	0 3 2 1 3 2 2 0 0 0 0 15 Σ	0 0 2 1 0 2 2 0 0 0 0 0 8 Σ	0 4 2 0 0 3 1 1 1 1 0 0 16 Σ	
1994	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 Σ	1 0 1 2 1 0 0 0 0 0 2 6 Σ	1 9 2 4 0 0 0 0 0 3 1 37 Σ	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 11 Σ	0 5 1 0 2 3 2 0 1 0 18 Σ	0 0 2 0 0 0 0 0 0 0 0 3 Σ	0 3 1 0 0 0 0 0 0 0 0 9 Σ	
1995	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 Σ	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 6 Σ	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 11 Σ	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 11 Σ	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 18 Σ	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 3 Σ	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 9 Σ	
1996	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 Σ	2 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 5 Σ	2 6 5 0 0 0 0 49 Σ	1 0 0 0 0 0 0 1 Σ	15 0 0 0 0 0 0 0 Σ	4 0 0 0 0 0 0 0 Σ	14 0 0 0 0 0 0 0 Σ	
1997	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 Σ	4 0 2 0 0 0 0 0 0 0 0 11 Σ	40 10 7 4 0 1 1 39 Σ	8 1 0 0 0 0 0 0 Σ	23 3 0 0 0 0 0 0 Σ	7 2 0 0 0 0 0 0 Σ	12 3 0 0 0 0 0 0 Σ	

本データは、気象庁電子閲覧室から取得したものである。
(<http://www.data.kishou.go.jp/>)
波浪観測地に近い風速観測地を選定し、過去10年間(1993年～2002年)に最大瞬間風速23m/sを超える日数をまとめた。
波浪観測地と同じ箇所に風速観測地が無い場合は、波浪観測地に最も近い風速観測地を選定した。

波浪観測地	宮古	浜金谷	下田	神戸	志布志	伊王島	藍島
風速観測地	宮古	館山	石廊崎	神戸	油津	長崎	下関
合計Σ	54	99	467	62	166	50	99
日	0.0148	0.0271	0.1279	0.0170	0.0455	0.0137	0.0271
率							

平均日数=8日/10年(9日/年)
石廊崎は、風速V >23m/s の日数が極端に多いため除外
平均率=0.025
Σ/3650日(10年)

4.2.4 一次選定（周波数応答解析による検討）

（１）検討方法

一次選定では、複数の有義波に対して周波数応答解析を実施し、その結果得られた上部工位置における応答加速度により、適用性の判定を行った。応答加速度の着目位置は、橋軸直角方向の支点間中央（フェンダー間中央位置）に相当する節点 6 の位置とした（図－ 4.2.11）。これは、図－4.2.12 に示す本橋の周波数応答関数 $A(f)$ から、桁位置の応答加速度が節点 6 で最も大きくなる可能性があるからである。有義波の検討ケースは、表－4.2.4 に示すとおり、計 15 ケースとした。

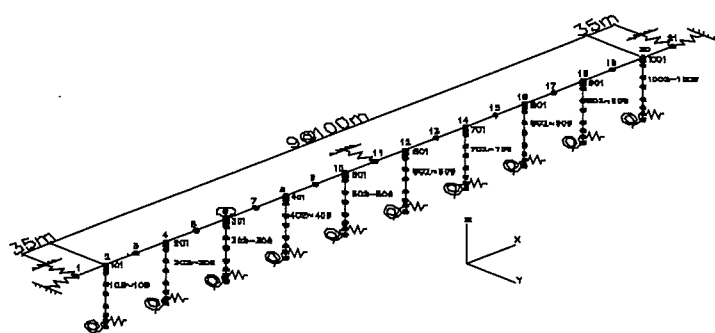


図-4.2.11 応答加速度の着目位置

表-4.2.4 有義波ケース

波高 $H_{1/3}$ (m)	周期 $T_{1/3}$ (s)
3.0	6.0
	5.0
	4.0
	3.0
	2.0
2.0	6.0
	5.0
	4.0
	3.0
	2.0
1.0	6.0
	5.0
	4.0
	3.0
	2.0

（２）波スペクトル

検討用有義波の波スペクトル密度関数 $S(f)$ は、下式の Bretschneider&光易により算出した。その結果を図－4.2.13 に示す。

$$S(f) = 0.257 \cdot H_{1/3}^2 \cdot T_{1/3} \cdot (T_{1/3} \cdot f)^{-5} \cdot \exp [-1.03 \cdot (T_{1/3} \cdot f)^{-4}]$$

ここに、

$S(f)$: 波スペクトル密度関数 ($m^2 \cdot s$)

$H_{1/3}$: 有義波高(m)

$T_{1/3}$: 有義波周期(s)

f : 波の周波数

直角方向 (sway) 周波数応答関数 $A(f)$

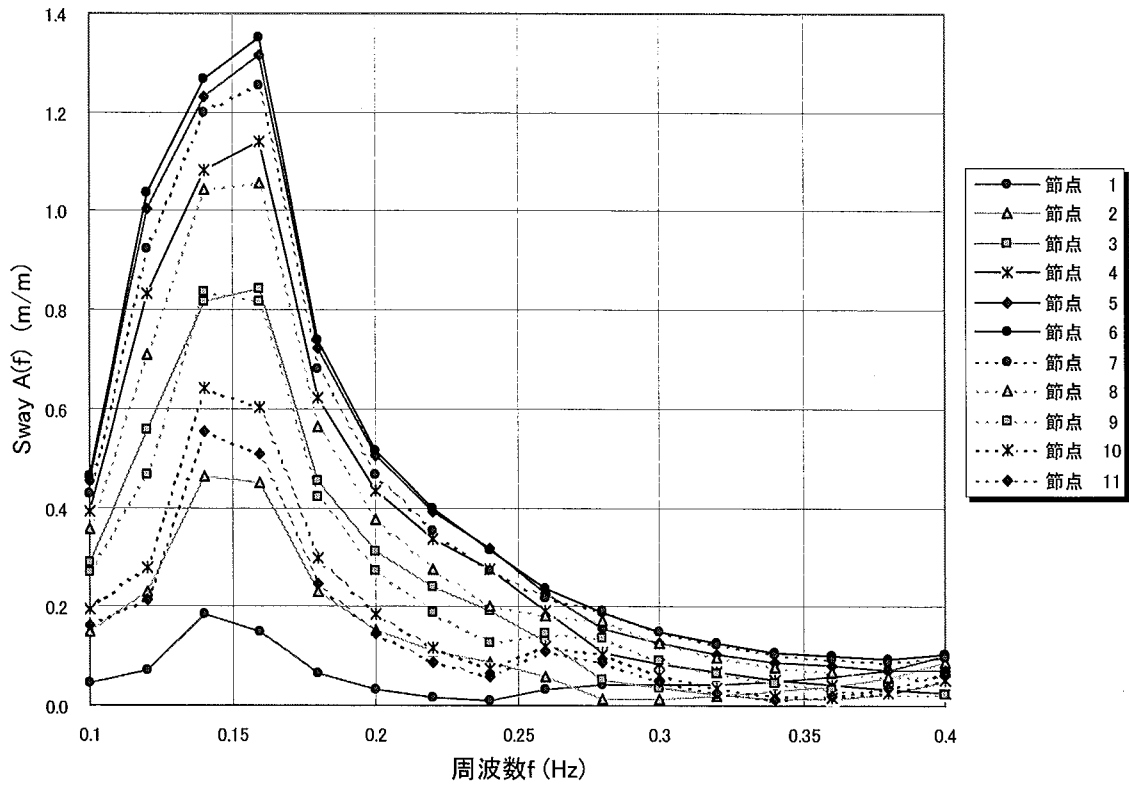


図-4.2.12 桁位置の Sway 周波数応答関数 $A(f)$

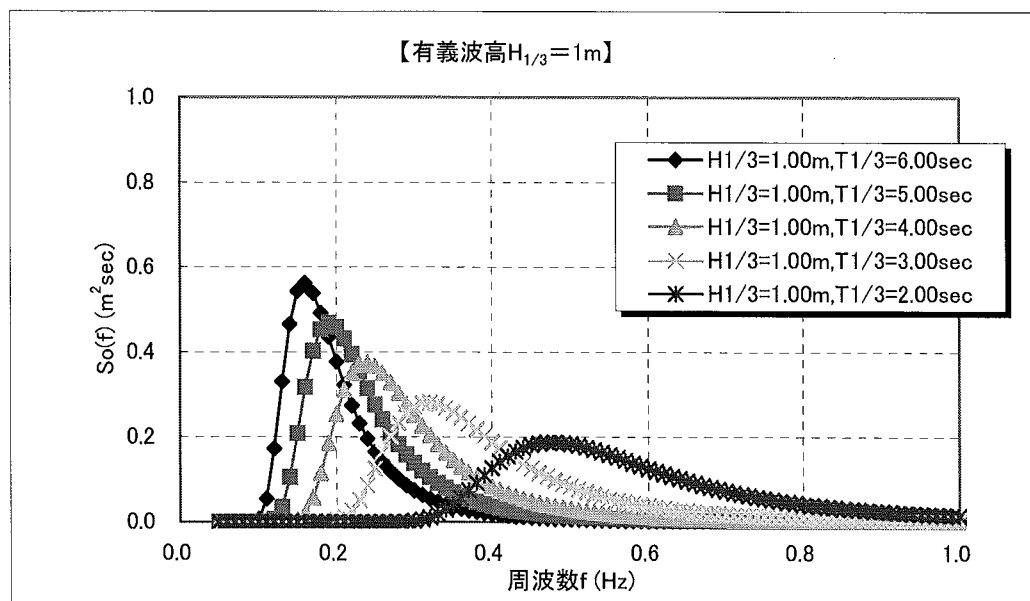
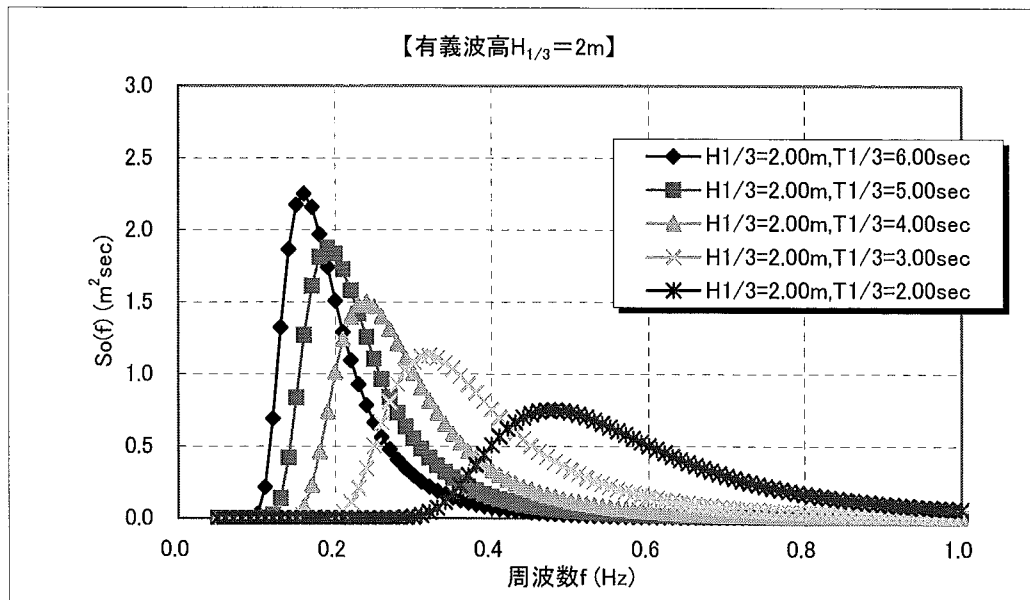
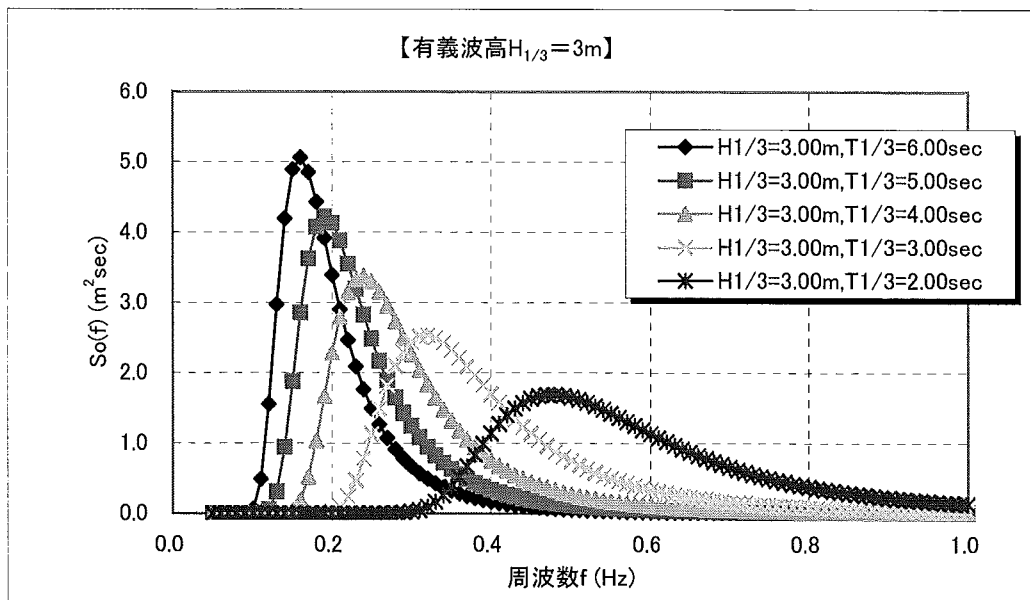


図-4.2.13 Bretschneider&光易の波スペクトル $So(\omega)$

(3) 周波数応答解析結果と適用可能有義波

対象橋梁の節点 6 (着目節点) における周波数応答関数 $A(f)$ を算出した結果を図-4.2.14 に示した。不規則波中における周波数応答は、規則波に対する解を線形重ね合わせすることによって求めることができる。ここに、浮体の周波数応答関数 $A(f)$ が与えられると、不規則波中の浮体の応答スペクトル $S_o(f)$ は下式に示すように、規則波中の浮体の周波数応答関数 $A(f)$ の二乗と波スペクトル密度関数 $S(f)$ との積で表される。(この方法を重ね合わせの原理といい、この原理に基づく方法を線形重ね合わせ法という)。図-4.2.15 に、波スペクトル密度関数 $S(f)$ と周波数応答関数 $A(f)$ を重ね合わせた結果を示す。

$$S_o(f) = |A(f)|^2 \cdot S(f)$$

波高の極値分布が Rayleigh 分布にしたがうと仮定すると、応答スペクトルの面積 (図-4.2.15 で $f=0 \sim f=\infty$ までのスペクトルに囲まれた面積) から応答の分散 σ^2 が求められる。また、この分散 σ^2 と応答値 $X_{1/3}$ は、下式の統計的關係が成り立つ。

$$X_{1/3} = 2.0 \cdot \sigma$$

上記関係から、節点 6 における応答値を算出した結果を表-4.2.5 に示す。同表の薄い網掛部は許容値を満足するケースである。また、濃い網掛部は許容値を満足しないものの許容値に対する超過量が少ないケースである。また、図-4.2.16 は表-4.2.5 に基づき、水平方向の応答加速度が許容値を満足する有義波の範囲と、満足しない有義波の範囲をグラフ化したものである。

以上から、対象橋梁の適用可能性の高い地点は、概ね次の有義波を有する地点であることがわかった。

- ①有義波高 $H_{1/3}=3.0\text{m}$ の場合：有義周期 $T_{1/3} \leq 4.0\text{s}$ となる有義波
- ②有義波高 $H_{1/3}=2.0\text{m}$ の場合：有義周期 $T_{1/3} \leq 5.0\text{s}$ となる有義波
- ③有義波高 $H_{1/3}=1.0\text{m}$ の場合：全ての有義周期 $T_{1/3}$

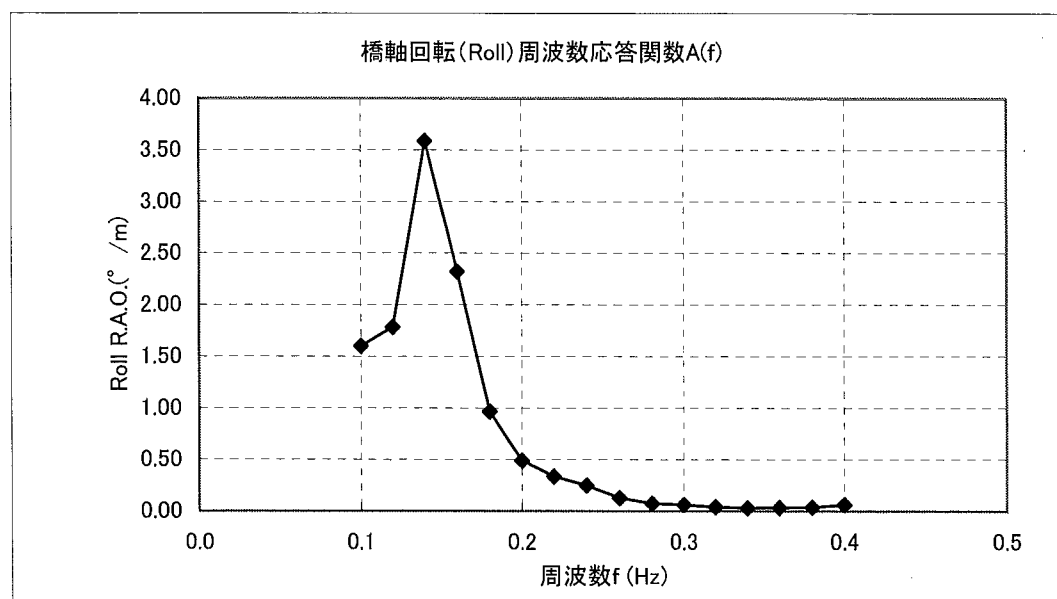
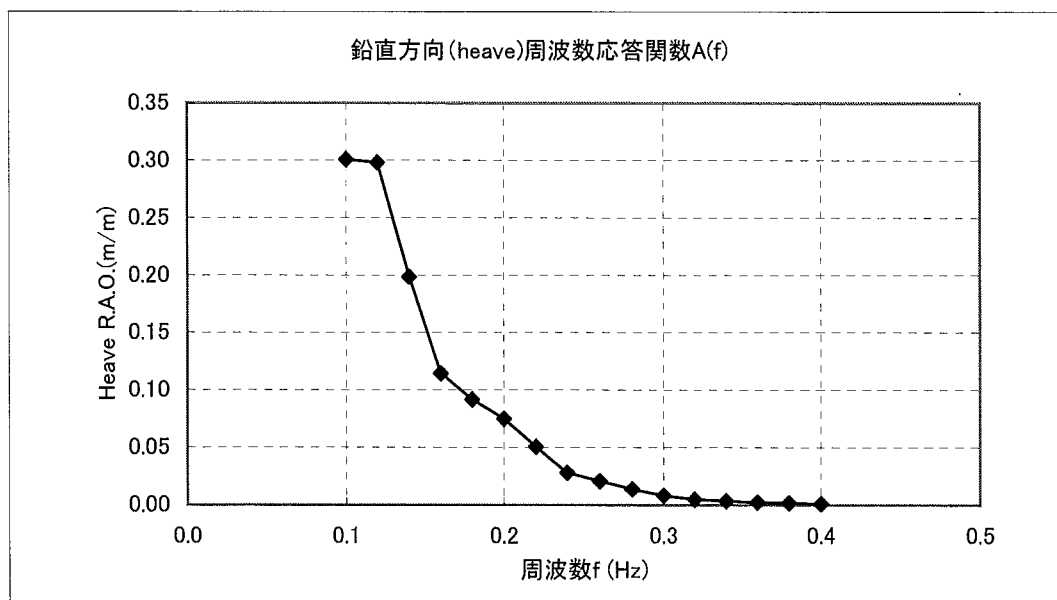
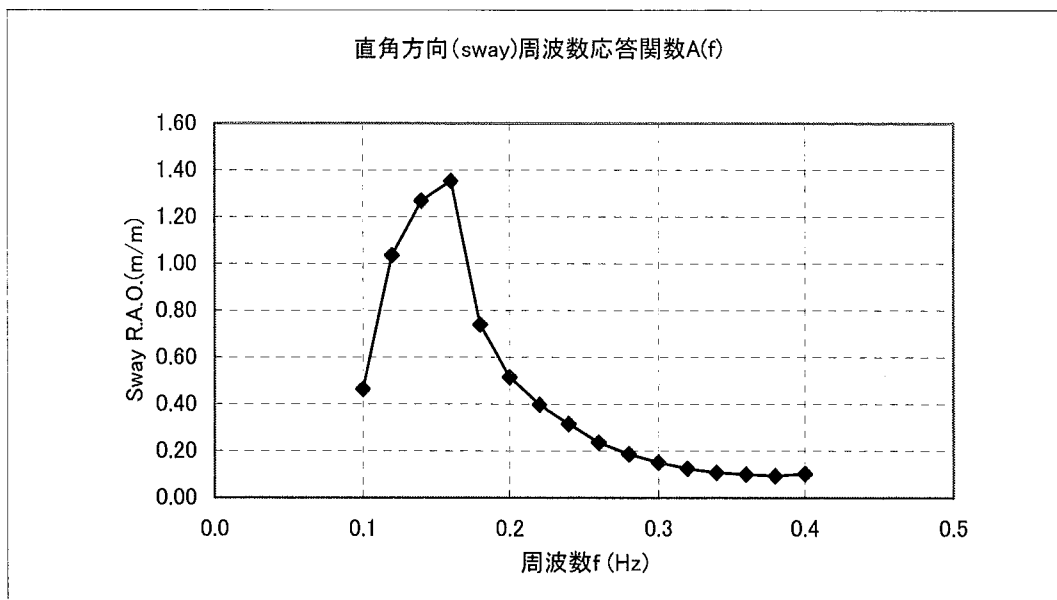


図-4.2.14 解析モデルの周波数応答関数 $A(f)$

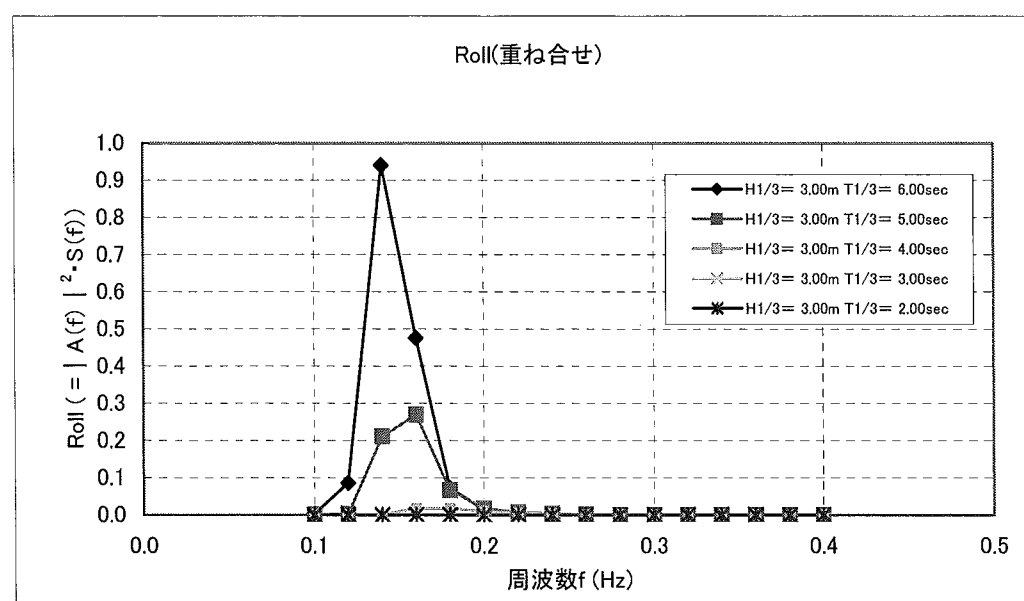
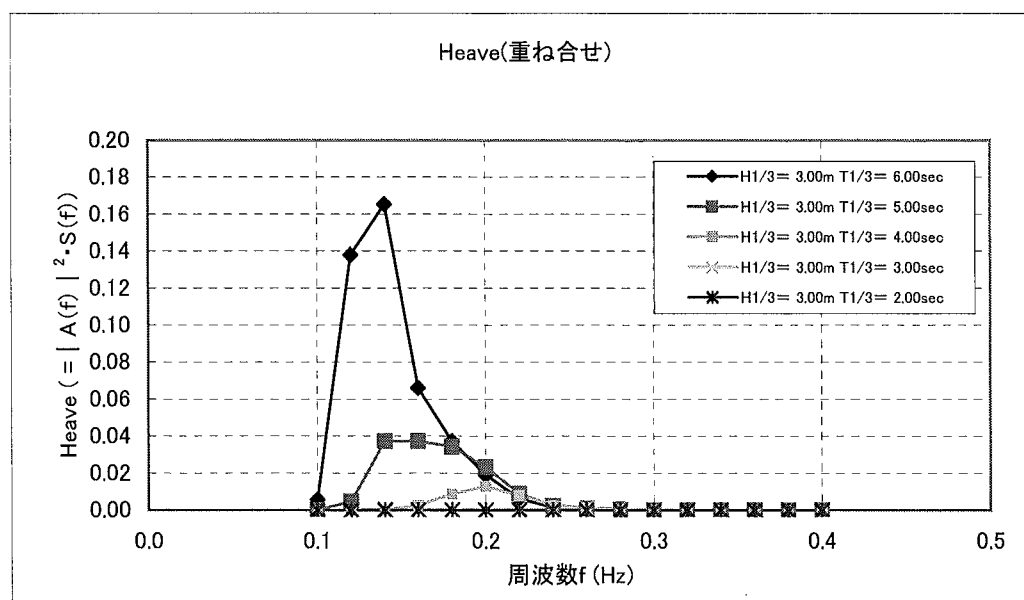
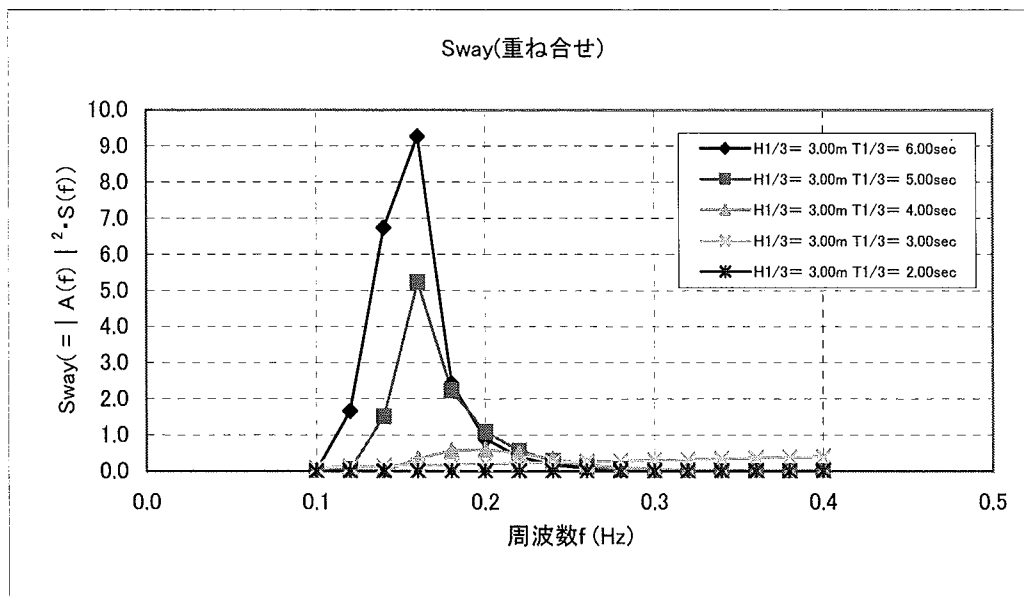


図-4.2.15(a) 有義波高 $H_{1/3}=3m$ の応答スペクトル $S_o(f)$

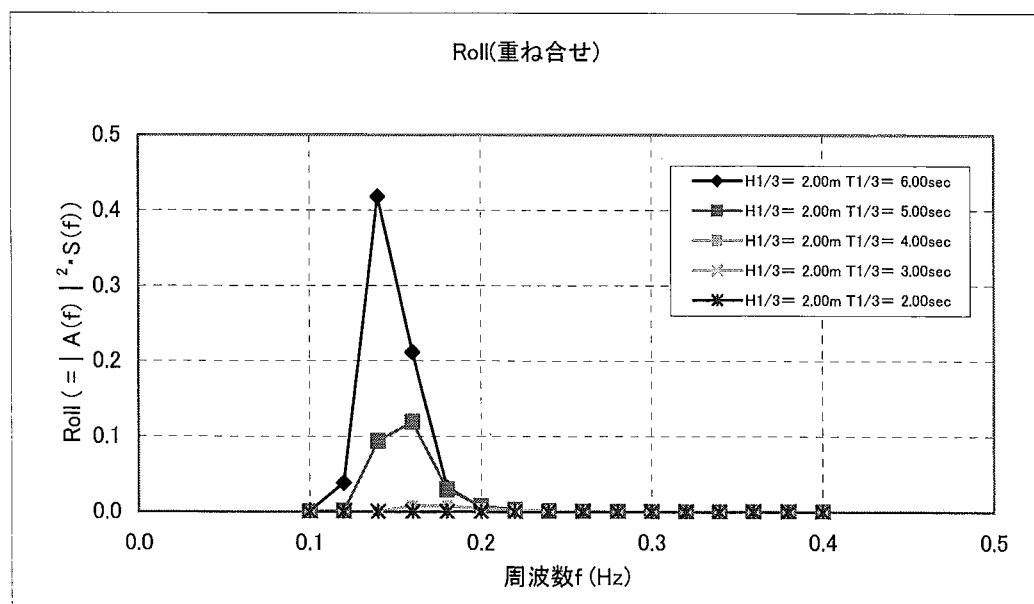
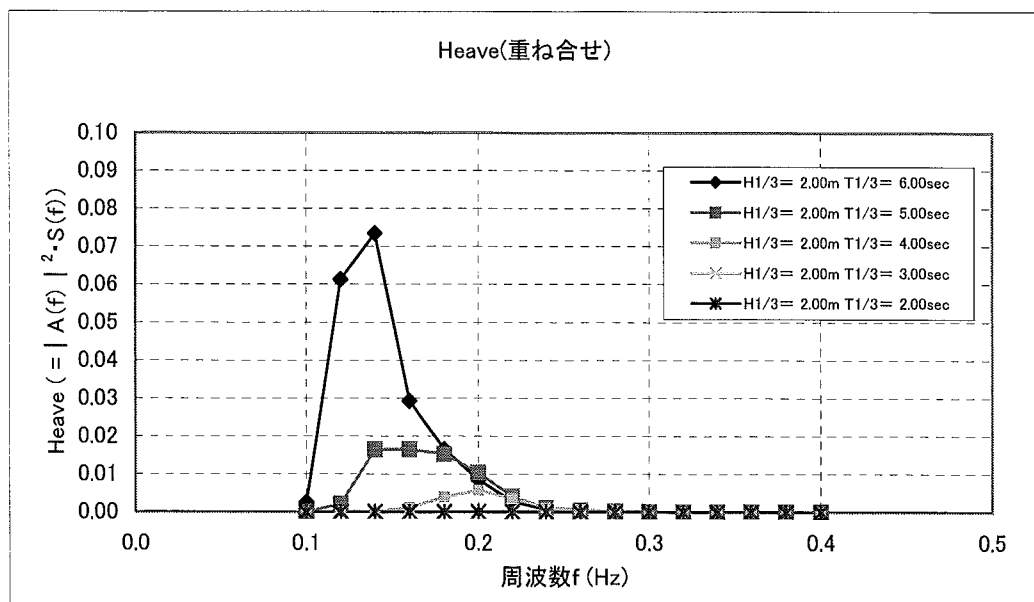
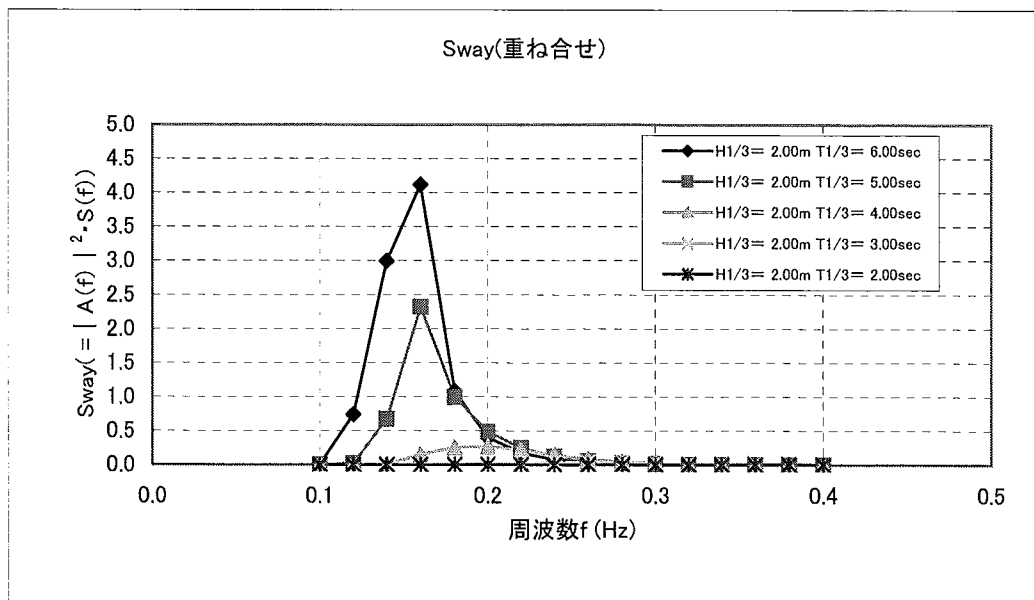


図-4. 2. 15(b) 有義波高 $H_{1/3}=2m$ の応答スペクトル $S_o(f)$

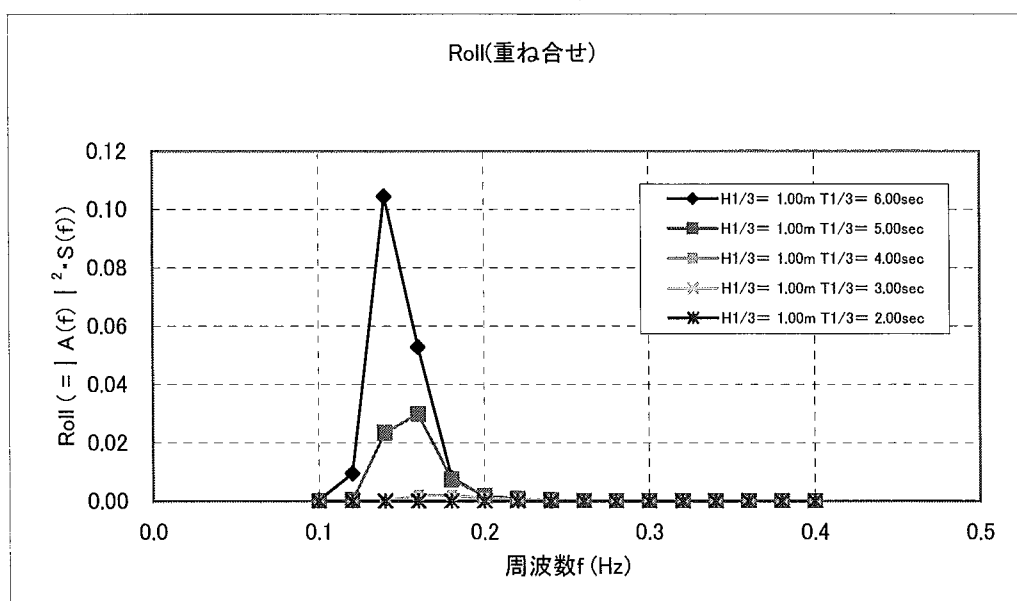
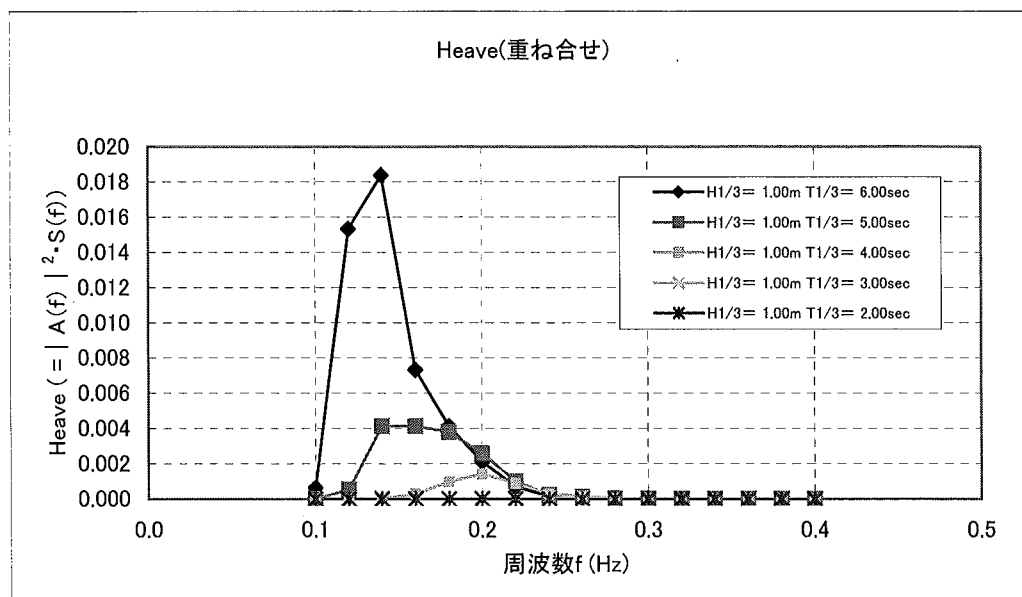
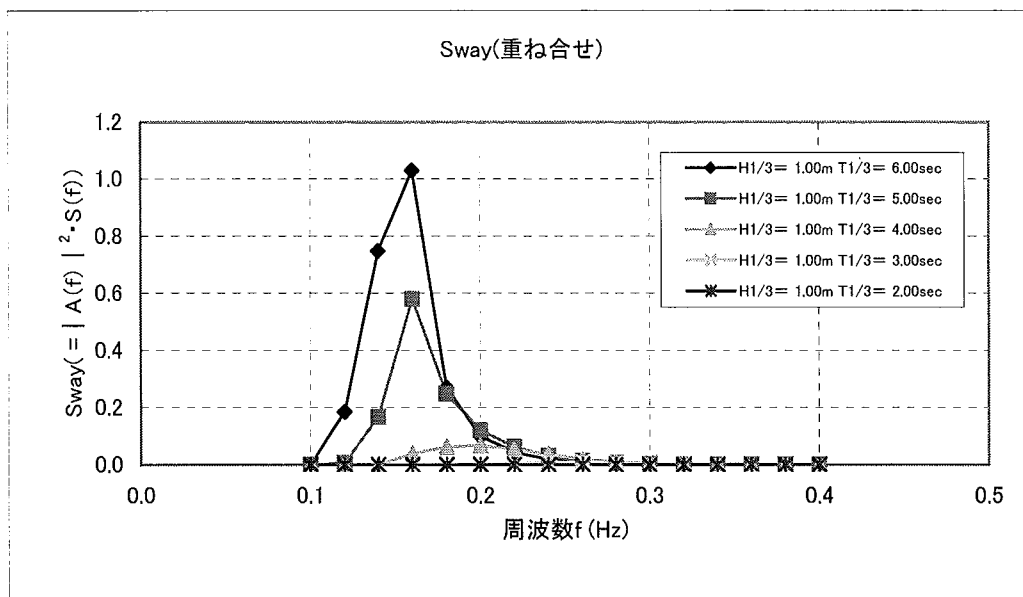


図-4. 2. 15(c) 有義波高 $H_{1/3}=1m$ の応答スペクトル $S_o(f)$

表-4.2.5 周波数応答解析結果（節点 6 の応答加速度）

検討有義波ケース		有義応答値（加速度）		
有義波高 $H_{1/3}$ (m)	有義周期 $T_{1/3}$ (s)	直角並進 (Sway) (m/s ²)	鉛直並進 (Heave) (m/s ²)	橋軸回転 (Roll) (deg/s ²)
3.0	6.0	1.318	0.188	0.357
	5.0	0.947	0.109	0.215
	4.0	0.468	0.054	0.067
	3.0	0.192	0.014	0.014
	2.0	0.048	0.001	0.003
2.0	6.0	0.879	0.125	0.238
	5.0	0.631	0.073	0.143
	4.0	0.312	0.036	0.045
	3.0	0.128	0.010	0.010
	2.0	0.032	0.001	0.002
1.0	6.0	0.439	0.063	0.119
	5.0	0.316	0.036	0.072
	4.0	0.156	0.018	0.022
	3.0	0.064	0.005	0.005
	2.0	0.016	0.000	0.001

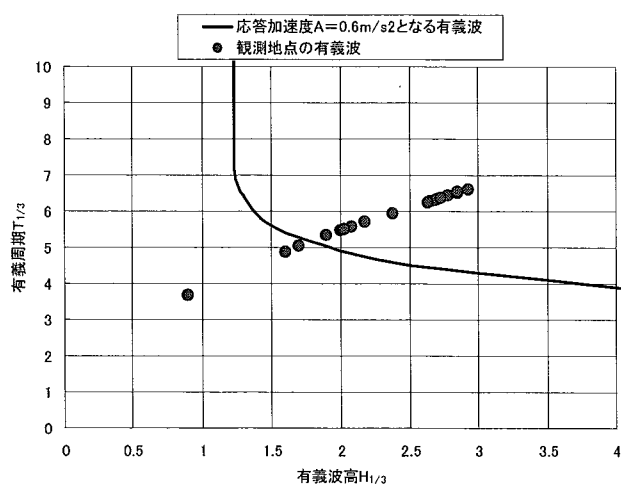


図-4.2.16 加速度の許容値を満足する有義波の範囲

(4) 適用性の判定

全国の波浪観測データに基づき各観測地の有義波諸元を算定し、(3)で検討した適用性の高い有義波との比較を行い、浮体橋の適用性を判定した。なお、巻末資料2には各観測地における有義波諸元の算出過程を載せている。

港湾技研資料第744号(1993年)から、波浪観測40地点の観測波の有義波高 $H_{1/3}$ の累積率と有義周期 $T_{1/3}$ の累積率を図-4.2.17にそれぞれ示す。これに基づき、観測有義波高 $H_{1/3}$ の累積率98%が、3.0m以下となる観測地(有義波高3m以下の非超過率98%の観測地)を表-4.2.6に示した。また、同表には、累積率が98%となる有義波諸元を算出した結果も合わせて示す。

同表から、宮古、浜金谷、および神戸は(3)で検討した適用可能性の高い有義波の地点である。よって、これら3地点を一次選定として抽出した(表-4.2.6の判定欄の○の地点)。一方、下田、志布志、伊王島、および藍島は、有義周期が5秒を若干超えているものの有義波高が比較的小さい(いずれも2m以下)。二次選定で実施する係留系の非線形性を考慮した詳細な検討で適用性を有する可能性がある。よって、これらの地域も参考として、時刻歴応答解析による適用性の検討を行うものとした(表-4.2.6の判定欄の△の地点)。

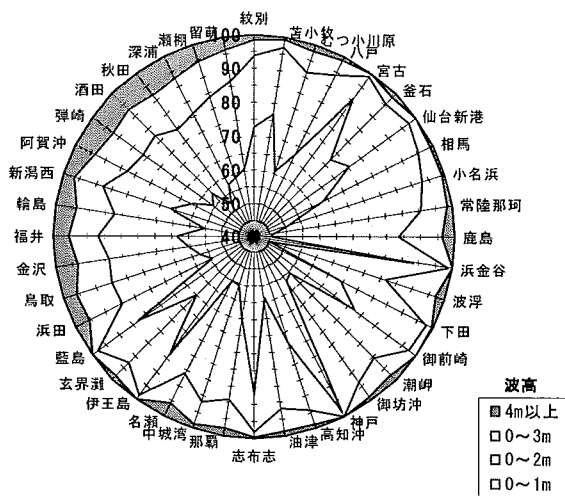


図-4.2.17(a) 観測有義波高 $H_{1/3}$ の累積率

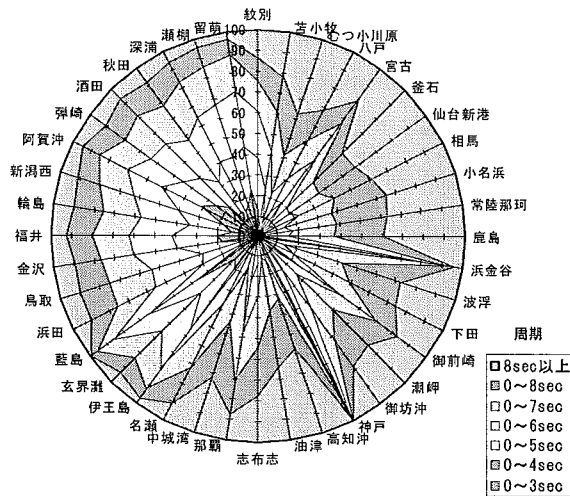


図-4.2.17(b) 観測有義周期 $T_{1/3}$ の累積率

表-4.2.6 適用性の判定 (一次選定)

観測地	有義波諸元		判定
	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	
紋別	2.70	6.34	
苫小牧	2.18	5.69	
八戸	2.63	6.25	
宮古	1.60	4.88	○
釜石	2.38	5.95	
仙台新港	2.08	5.56	
相馬	2.38	5.95	
小名浜	2.65	6.28	
常陸那珂	2.78	6.43	
浜金谷	1.70	5.03	○
下田	2.00	5.46	△
御前崎	2.03	5.49	
潮岬	2.93	6.60	
御坊沖	2.68	6.31	
神戸	0.90	3.66	○
高知沖	2.63	6.25	
油津	2.85	6.4.2	
志布志	1.90	5.32	△
伊王島	1.90	5.32	△
藍島	1.90	5.32	△
玄界灘	2.73	6.37	
中城湾	2.85	6.4.2	

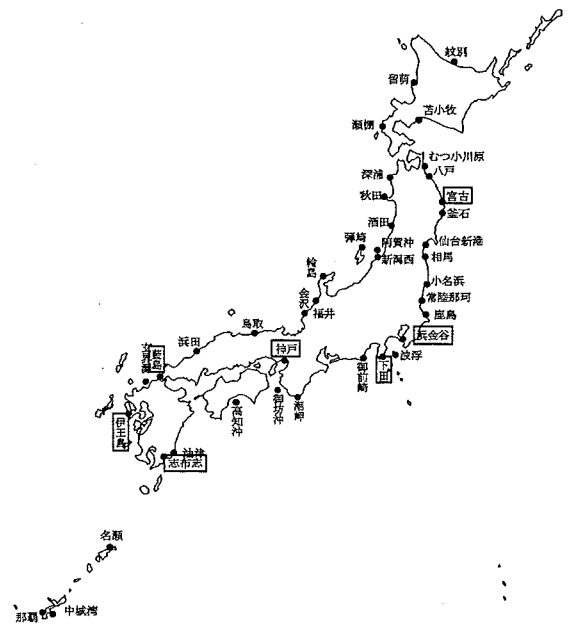


図-4.2.18 一次選定地点

○ : 一次選定地点
△ : 一次選定地点 (参考)

4.2.5 二次選定（時刻歴応答解析による検討）

（1）検討方法

本検討では、時刻歴応答解析により適用性の判定を実施した。対象地点は、4.2.4 で選定された宮古、浜金谷、神戸と、参考として下田、志布志、伊王島、藍島の計 7 地点である。各観測地の検討用有義波は、前述の表 4.2.6 に示したとおりである。

1) 解析モデル

時刻歴応答解析に用いる解析モデルは、周波数応答解析と同じである。ただし、係留系の復元力特性は非線形性を考慮したモデルとした。カテナリー係留の復元力特性を図 4.2.19 に、フェンダー係留の復元力特性を図 4.2.20 にそれぞれ示す。

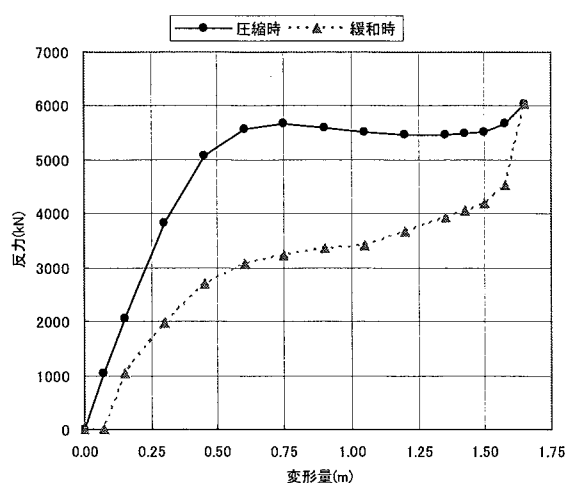


図 4.2.19 フェンダー係留の復元力特性

注) フェンダー材料（防舷材 3000RH：1 個当たり）の復元力特性である。

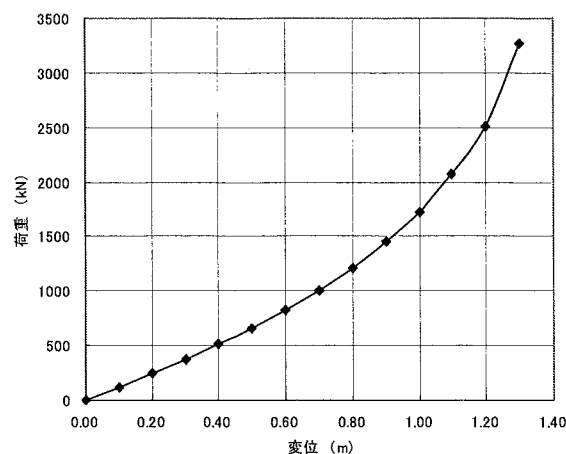


図 4.2.20 カテナリー係留の復元力特性

注) ボンツーン 1 基あたりのカテナリー係留（計 10 本）による復元力特性。

したがって、荷重はボンツーン重心に作用する荷重を、変位は荷重によるボンツーンの変位を示している。

2) 不規則波力

時刻歴応答解析に用いる外力は、不規則波力の時系列として与える。不規則波力は、規則波力の重ね合わせにより算出する。その際、不規則波力の波スペクトル密度を一定としても、重ね合わせる複数の規則波の振幅と位相差が異なると、異なった不規則波力の時系列が発生する。その結果、時刻歴応答解析により得られた応答値も異なったものとなる。例えば、図 4.2.21 は、振幅と位相差が異なる $\sin \theta$ 波を重ね合わせた結果である。ケース 1 は、 θk ($\theta k = k \cdot \pi/8$) の位相差を持たせて重ね合わせたケースであり、ケース 2 は、 π の位相差を持たせて重ね合わせた結果である。同図から、重ね合わせの方法により、合成される合成波（不規則波）の形状が異なることが確認できる。

以上を踏まえ、本検討では、重ね合わせの際の位相差を 3 ケース考え、これらにより算出された不規則波 3 波に対し検討を行うこととした。なお、適用性の判断に用いる応答値は、3 ケースの許容値の平均値とした。

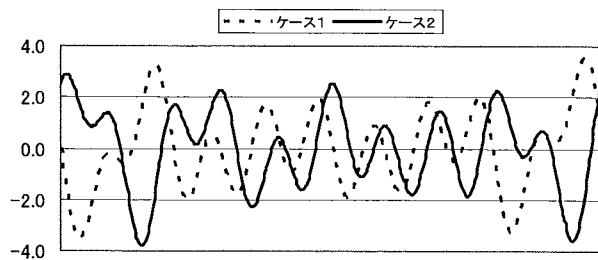


図-4.2.21 波の重ね合わせ

$$\text{ケース 1 : } F(t) = \sum_{k=1}^4 a_k \cdot \cos(\omega_k \cdot t + \theta_k)$$

$$\text{ケース 2 : } F(t) = \sum_{k=1}^4 a_k \cdot \cos(\omega_k \cdot t + \pi)$$

$\theta_k : 0 \leq \theta_k \leq 2\pi$ における一様な乱数

(2) 時刻歴応答解析結果と適用性の判定

1) 固有値解析と振動特性

対象橋梁の固有解析を行った結果を図-4.2.22 に示す。刺激係数、有効質量比等は橋軸直角方向の値である。図中の固有モード図は、主要な（刺激係数が大きい）4つの固有モード図を示している。12次モードおよび17次モードは、それぞれポンツーンの対称1次モード（浮体橋の剛体挙動）と対称2次モードである。30次モードと33次モードは、桁の対称1次モードと対称2次モードである。モード図は示していないが、1次モードは橋軸方向のモード、2次モードから10次モードまでは橋脚の単独のモードである。

図-4.2.23 には、節点6における Sway（直角方向）の周波数応答関数を、図-4.2.24 には加速度応答スペクトルをそれぞれ示す。図-4.2.23 から、本橋は、周波数 0.15Hz（固有周期 6.7s）の振動成分が Sway の応答に大きく寄与する特性を示していることが確認できる。これにより、対象橋梁の桁の対称1次モードである 30 次モード（周波数 0.147Hz）が、Sway の応答値に大きく影響するものと考えられる。

各周波数毎の強度を表す図-4.2.24（周波数応答関数と、有義波の波スペクトル密度関数との重ね合わせ）から、波の周波数成分 0.15Hz（固有周期 6.7s）において、有義波の周期が $T_{1/3}=5$ および $T_{1/3}=6$ の波のスペクトル値が大きくなっていることが確認できる。一方、 $T_{1/3} \leq 4$ の有義波では、周波数成分

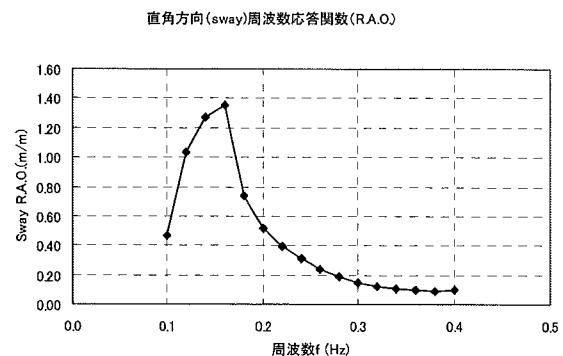


図-4.2.23 周波数応答関数（節点6）

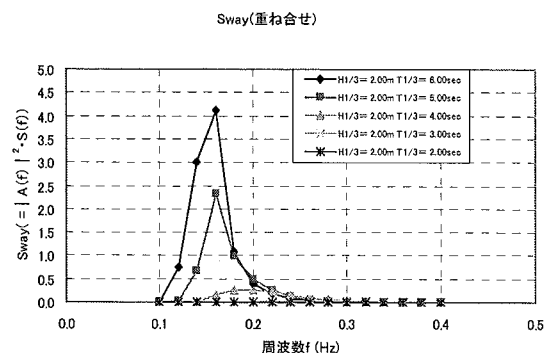


図-4.2.24 加速度応答スペクトル（節点6）

モード 次数	固有振動数 (Hz)	固有周期 (s)	刺激係数	刺激係数比	有効質量 (t, tm)	累積有効 質量比	モード形状
1	0.0466	21.4553	-0.0012	5.0000E-06	1.4904E-06	0.0000	橋軸方向モード
2	0.0481	20.8064	0.0020	8.0000E-06	4.1297E-06	0.0000	橋脚単独モード
3	0.0481	20.7874	-0.0021	8.0000E-06	4.6122E-06	0.0000	橋脚単独モード
4	0.0481	20.7839	0.0021	8.0000E-06	4.3343E-06	0.0000	橋脚単独モード
5	0.0481	20.7821	-0.0010	4.0000E-06	9.7100E-07	0.0000	橋脚単独モード
6	0.0481	20.7810	-0.0003	1.0000E-06	8.1188E-08	0.0000	橋脚単独モード
7	0.0481	20.7808	0.0000	0.0000E+00	4.0713E-10	0.0000	橋脚単独モード
8	0.0481	20.7807	0.0001	1.0000E-06	1.9382E-08	0.0000	橋脚単独モード
9	0.0481	20.7806	0.0000	0.0000E+00	2.2684E-09	0.0000	橋脚単独モード
10	0.0481	20.7801	-0.0003	1.0000E-06	9.1243E-08	0.0000	橋脚単独モード
11	0.0874	11.4459	-0.0153	5.8000E-05	2.3538E-04	0.0000	ポワン-逆対称1次
12	0.0866	10.3490	0.0000	1.0000E+00	6.9012E+04	0.7931	ポワン-逆対称1次
13	0.1112	8.9922	-0.0022	8.0000E-06	4.9232E-06	0.7931	
14	0.1113	8.9811	-0.0035	1.3000E-05	1.2148E-05	0.7931	
15	0.1116	8.9611	0.0024	8.0000E-06	5.7511E-06	0.7931	
16	0.1120	8.9272	0.0001	0.0000E+00	3.4489E-08	0.7931	
17	0.1131	8.8435	-0.0487	1.8500E-04	2.3700E-03	0.7931	ポワン-逆対称2次
18	0.1133	8.8224	-0.0017	7.0000E-06	2.8438E-06	0.7931	ポワン-逆対称2次
19	0.1157	8.6404	0.0030	1.2000E-05	8.2246E-06	0.7931	ポワン-逆対称2次
20	0.1167	8.5717	-0.0012	5.0000E-06	1.4878E-06	0.7931	ポワン-逆対称3次
21	0.1220	8.1951	-25.8942	9.8569E-02	6.7051E+02	0.8008	ポワン-逆対称3次
22	0.1230	8.1314	-0.0003	1.0000E-06	7.9027E-06	0.8008	ポワン-逆対称3次
23	0.1284	7.7280	-0.0020	8.0000E-06	3.8945E-06	0.8008	ポワン-逆対称3次
24	0.1329	7.5254	-0.0005	2.0000E-06	3.0190E-07	0.8008	ポワン-逆対称3次
25	0.1361	7.3485	6.8228	2.5972E-02	4.6552E-01	0.8014	ポワン-逆対称4次
26	0.1365	7.2201	-0.0009	3.0000E-06	8.2418E-07	0.8014	ポワン-逆対称4次
27	0.1419	7.0498	0.0031	1.2000E-05	9.5643E-06	0.8014	ポワン-逆対称4次
28	0.1449	6.9021	-41.1137	1.5650E-01	1.8903E+03	0.8208	ポワン-逆対称5次
29	0.1455	6.8705	0.0081	3.1000E-05	8.8041E-05	0.8208	ポワン-逆対称5次
30	0.1474	6.7650	9.4225	3.5867E-01	6.6778E+03	0.8228	ポワン-逆対称5次
31	0.1478	6.7608	0.0114	4.3000E-05	1.2974E-04	0.8228	ポワン-逆対称5次
32	0.1574	6.3517	0.0007	3.0000E-06	4.5995E-07	0.9228	ポワン-逆対称5次
33	0.2510	1.9624	0.6540	3.040E-02	2.7695E+02	0.9240	ポワン-逆対称5次
34	0.2543	3.9316	0.0000	0.0000E+00	8.4320E-10	0.9260	ポワン-逆対称5次
35	0.2693	3.4697	0.0001	1.0000E-06	1.8956E-08	0.9260	ポワン-逆対称5次
36	0.4208	2.3785	-78.2504	2.9028E-01	6.8141E+03	0.9978	ポワン-逆対称5次
37	0.5089	1.9652	0.0000	0.0000E+00	2.2811E-09	0.9978	ポワン-逆対称5次
38	0.6289	1.5952	0.0000	0.0000E+00	7.3660E-11	0.9978	ポワン-逆対称5次
39	0.6337	1.5781	0.0000	0.0000E+00	3.1237E-11	0.9978	ポワン-逆対称5次
40	0.8545	1.5279	20.7175	7.8693E-02	4.2922E+02	0.9978	ポワン-逆対称5次
41	0.7129	1.4027	0.0000	0.0000E+00	1.7181E-11	0.9978	ポワン-逆対称5次
42	0.8000	1.2501	0.0000	0.0000E+00	3.3448E-13	0.9978	ポワン-逆対称5次
43	0.8092	1.2358	0.0000	0.0000E+00	1.1664E-09	0.9978	ポワン-逆対称5次
44	0.8402	1.1802	0.0000	0.0000E+00	4.7478E-11	0.9978	ポワン-逆対称5次
45	0.8957	1.1164	0.0000	0.0000E+00	6.0027E-12	0.9978	ポワン-逆対称5次
46	0.9407	1.0631	0.0000	0.0000E+00	2.8631E-11	0.9978	ポワン-逆対称5次
47	0.9557	1.0483	0.0000	0.0000E+00	1.2230E-11	0.9978	ポワン-逆対称5次
48	0.9613	1.0402	0.0000	0.0000E+00	7.2559E-12	0.9978	ポワン-逆対称5次
49	0.9931	1.0070	0.0000	0.0000E+00	1.9993E-10	0.9978	ポワン-逆対称5次
50	0.9933	1.0068	0.0000	0.0000E+00	1.1918E-11	0.9978	ポワン-逆対称5次

※ 刺激係数、有効質量率は、橋軸角方向の値を示す。

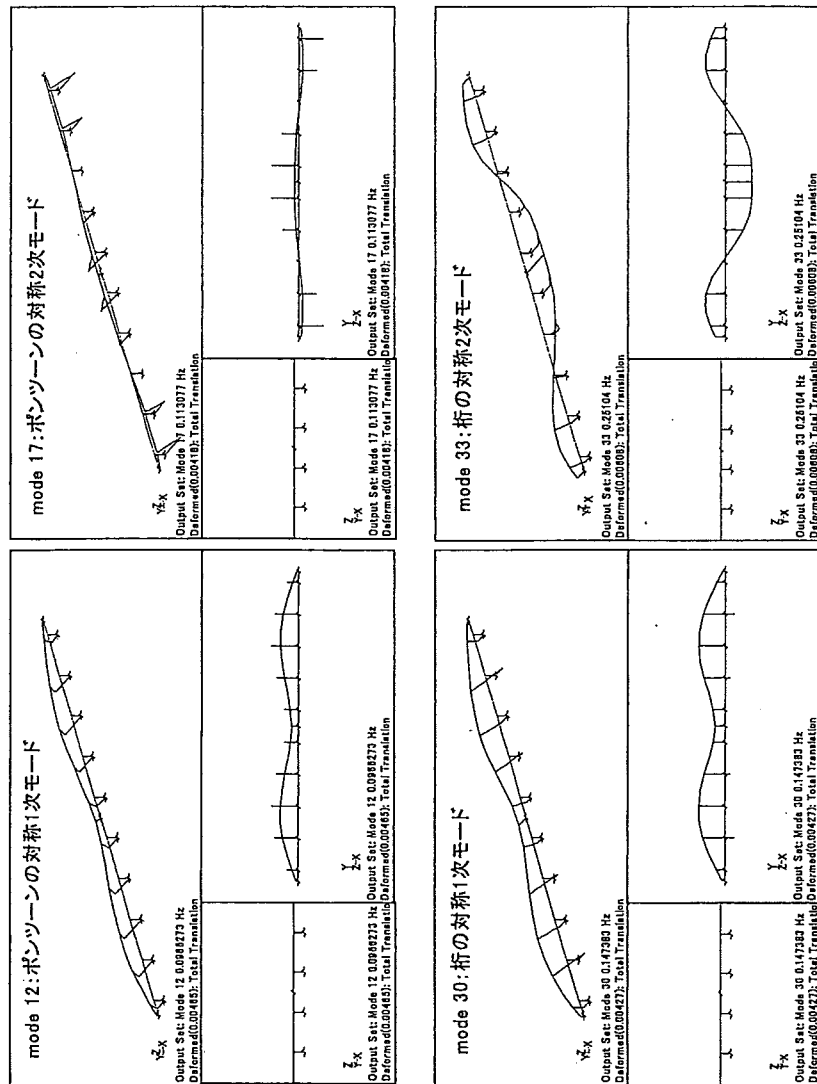


図-4.2.22 モード図

0.15Hz での応答スペクトル値が $T_{1/3}=5$ や $T_{1/3}=6$ に比べ、極端に小さくなっていることが確認できる。検討対象地点の有義波は、神戸を除いて $T_{1/3}$ が概ね 5~6 秒の間にある。そのため、これらの地点では比較的応答値が大きくなるものと推測される。逆に神戸の有義周期 ($T_{1/3}=3.7s$) では、応答値が小さくなるものと推測される。

2) 時刻歴応答解析結果

対象橋梁に対して時刻歴応答解析を実施した結果 (Sway、Heave、Roll の 3 方向の応答加速度および応答変位 (運動方向の名称定義は表-3.2.3 参照)) を、以下の図に示す。なお、同図は各対象地点に対して行った 3 ケース (3 つの不規則波) の内、1 ケースに対するものである。

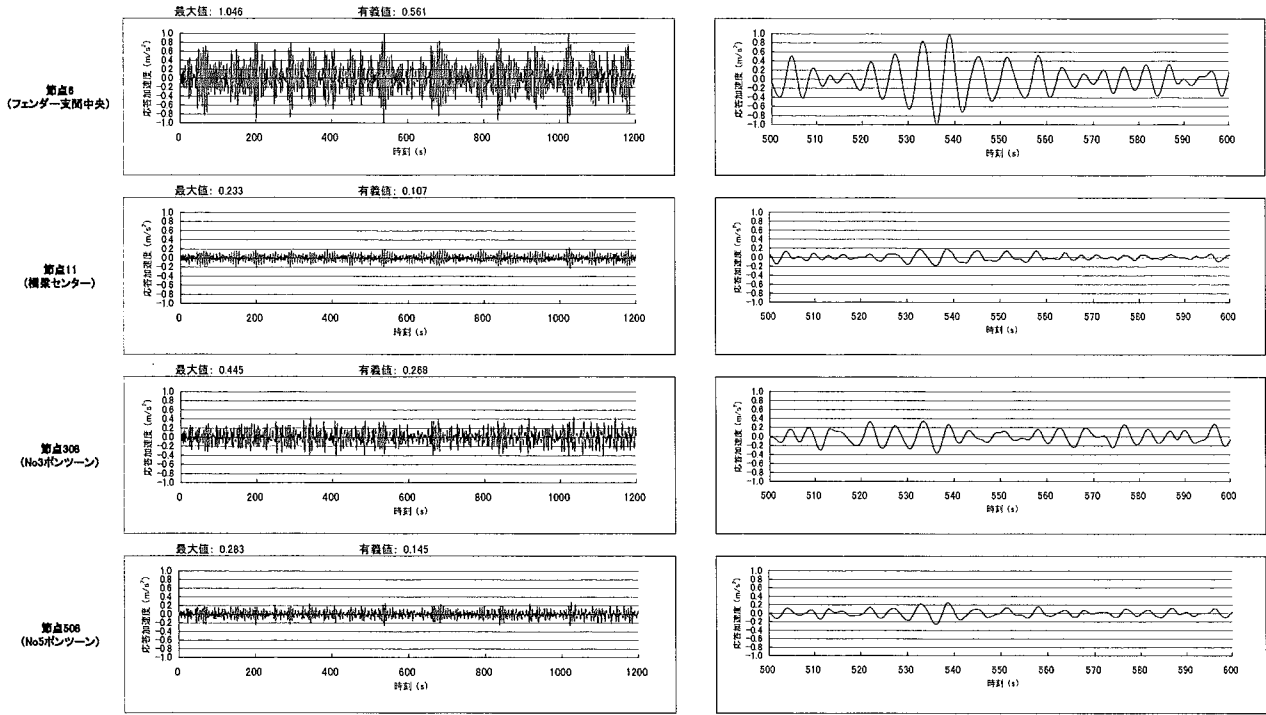
	直角方向	鉛直方向	橋軸周り	周波数応答解析結果
宮古	: 図-4.2.25	図-4.2.26	図-4.2.27	○
浜金谷	: 図-4.2.28	図-4.2.29	図-4.2.30	○
下田	: 図-4.2.31	図-4.2.32	図-4.2.33	△
神戸	: 図-4.2.34	図-4.2.35	図-4.2.36	○
伊王島	: 図-4.2.37	図-4.2.38	図-4.2.39	△
(志布志)	:	伊王島と同じ結果		△
(藍島)	:	伊王島と同じ結果		△

図-4.2.40~図-4.2.42 は、周波数応答解析において応答加速度の許容値を満足した 3 地点宮古、浜金谷および神戸における、上部工 (節点 6) とポンツーン (節点 308)、上部工橋梁中央位置 (節点 11) と上部工フェンダー支間中央位置 (節点 6) との、Sway 方向の応答加速度および応答変位を比較した結果を示す。

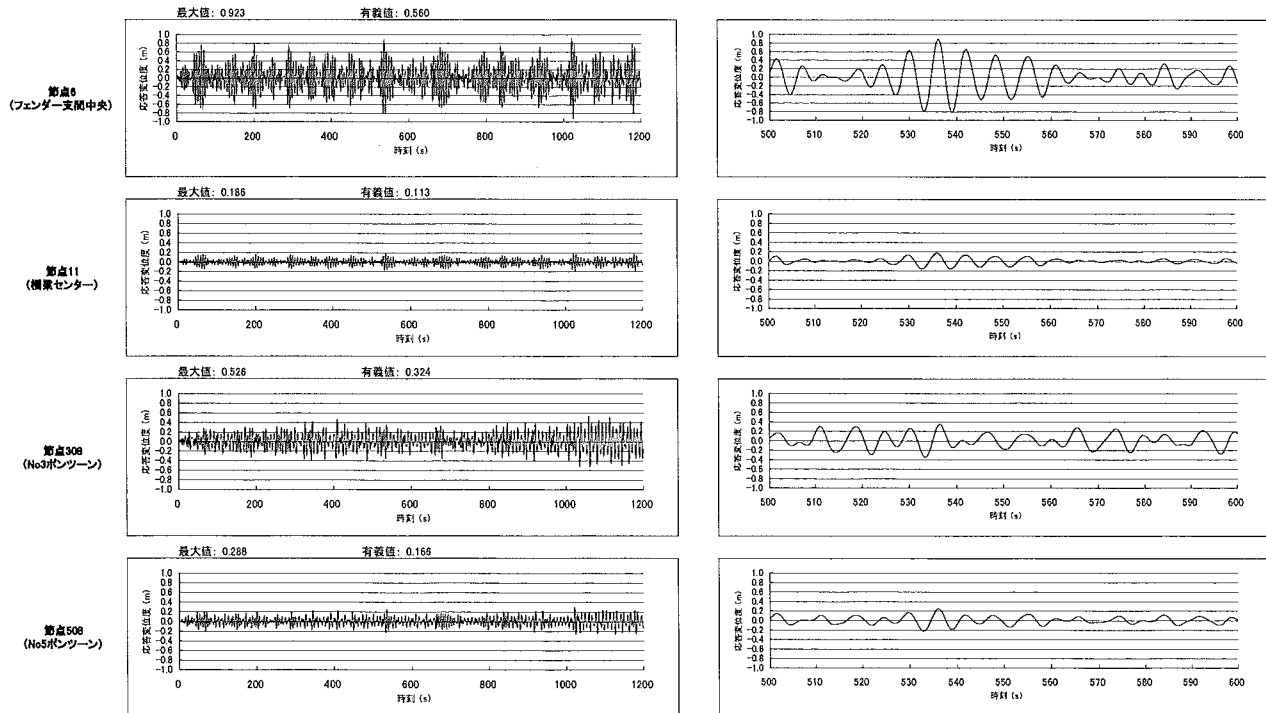
宮古、浜金谷、神戸ともに、上部工とポンツーンは同じ周期で振動していることがわかる。例えば、宮古の場合の図-4.2.40 (c) で、上部工は 6 秒前後の周期で振動しているのに対し、ポンツーンもほぼ同周期で振動している。これは、不規則波力の有義波周期 (宮古は $T_{1/3}=4.88s$) に対して、上部工が上部工の水平対称 1 次モード (30 次モード: $T=6.7s$) で振動し、ポンツーンがポンツーンの水平対称 5 次モード (28 次モード: $T=6.9s$) で振動している結果から、上部工とポンツーンが同周期で振動したものと考えられる。同様に、図-4.2.41(c)に示す浜金谷においても同じ傾向がみられる。

一方、神戸においては、図-4.2.42(c)に示すとおり、上部工およびポンツーンの周期が 9~10 秒と比較的長い周期で振動し、応答変位量は宮古の場合の 1/10 程度と非常に小さい。これは、不規則波力の有義波周期 (神戸は $T_{1/3}=3.66s$) に対して上部工およびポンツーンの主要モードの周期が 6 秒以上離れていることから、外力である不規則波力と共振しなかったために応答が小さくなったものと考えられる。

応答加速度



応答変位



不規則波力(入力外力)

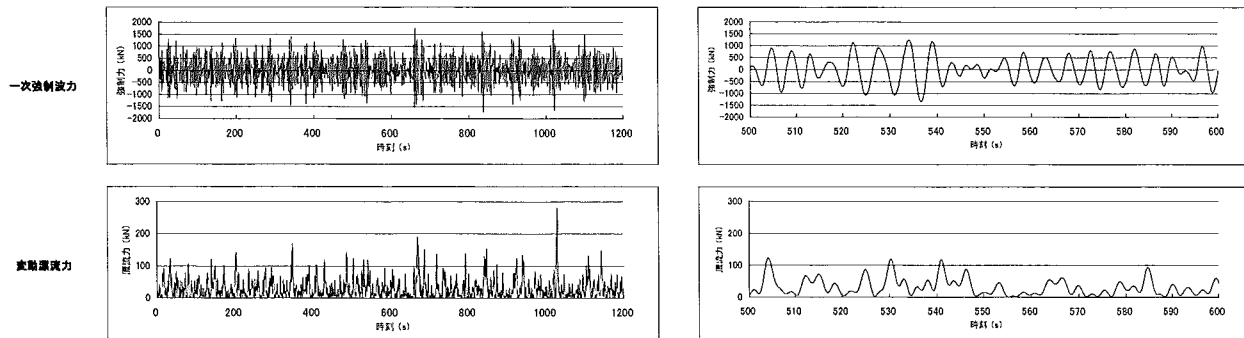
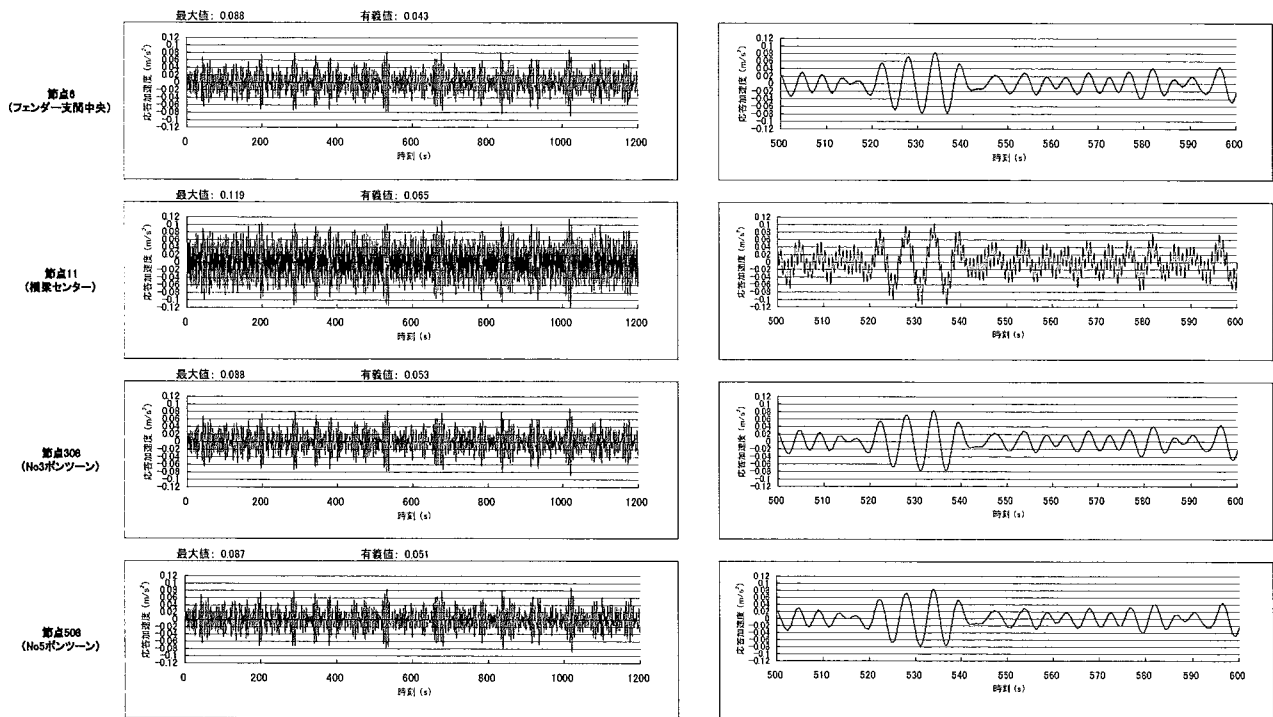
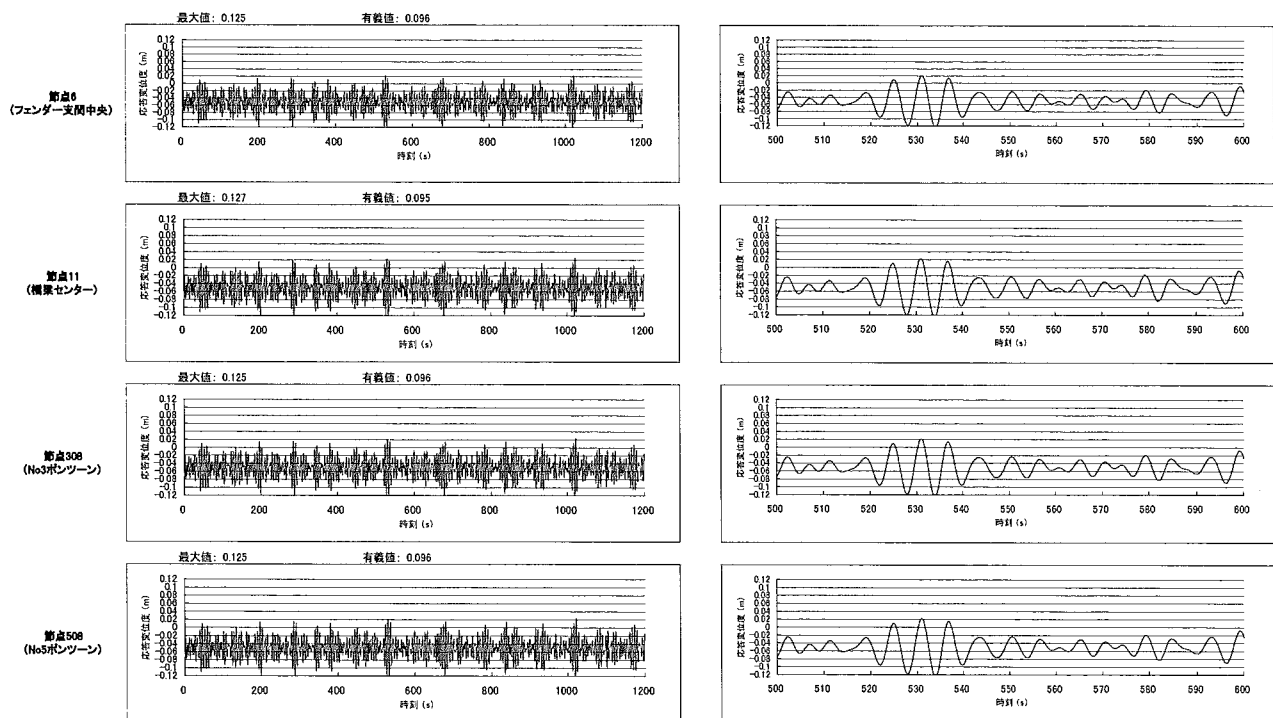


図-4.2.25 時刻歴応答解析結果：宮古・直角方向（Sway）

応答加速度



応答変位



不規則波力(入力外力)

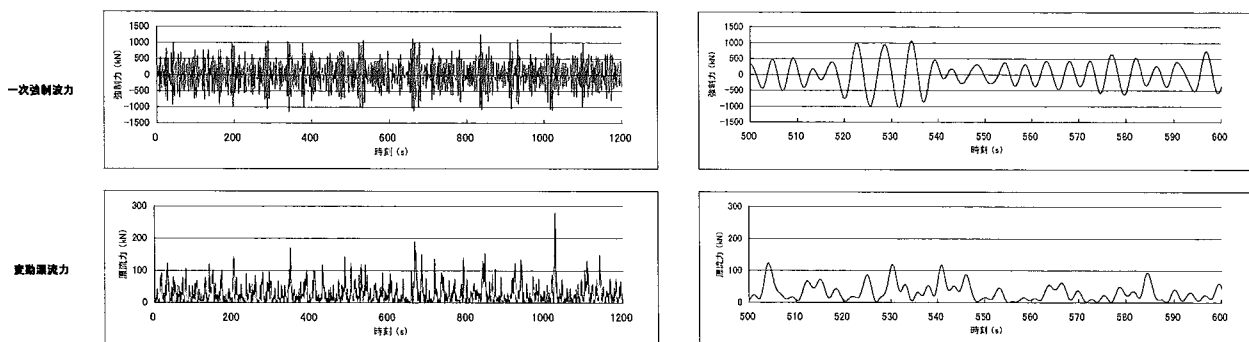
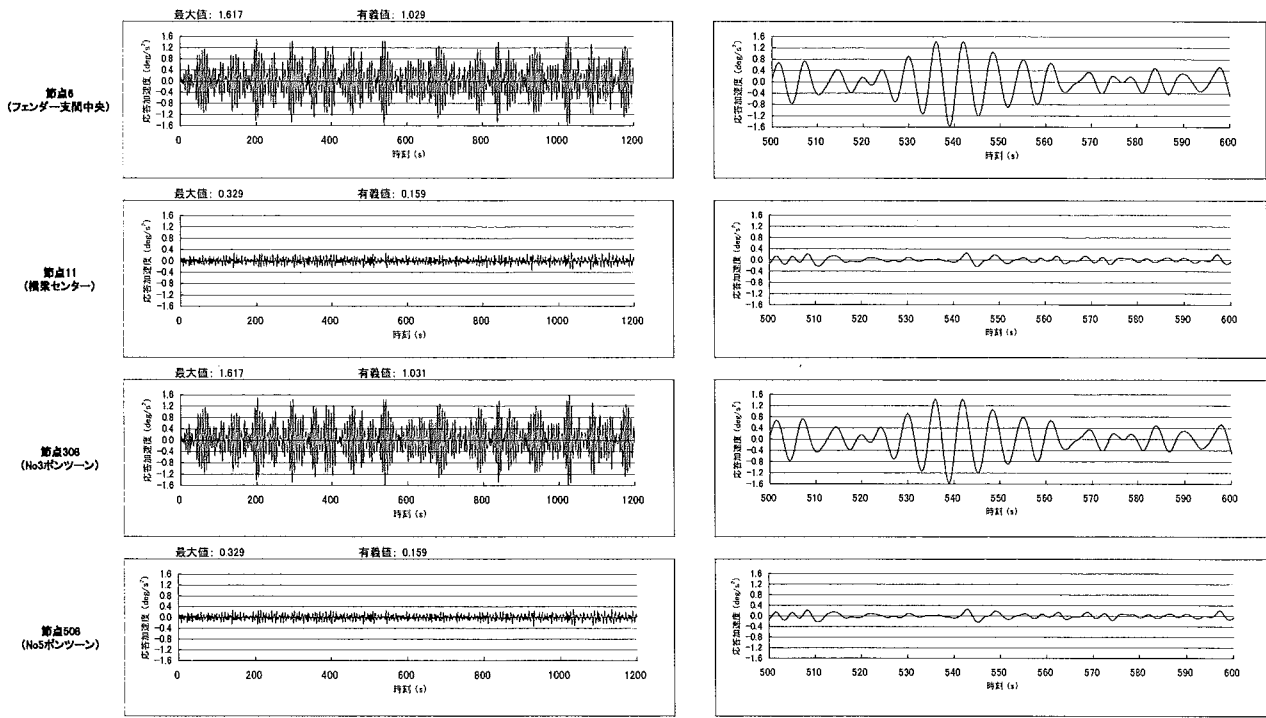
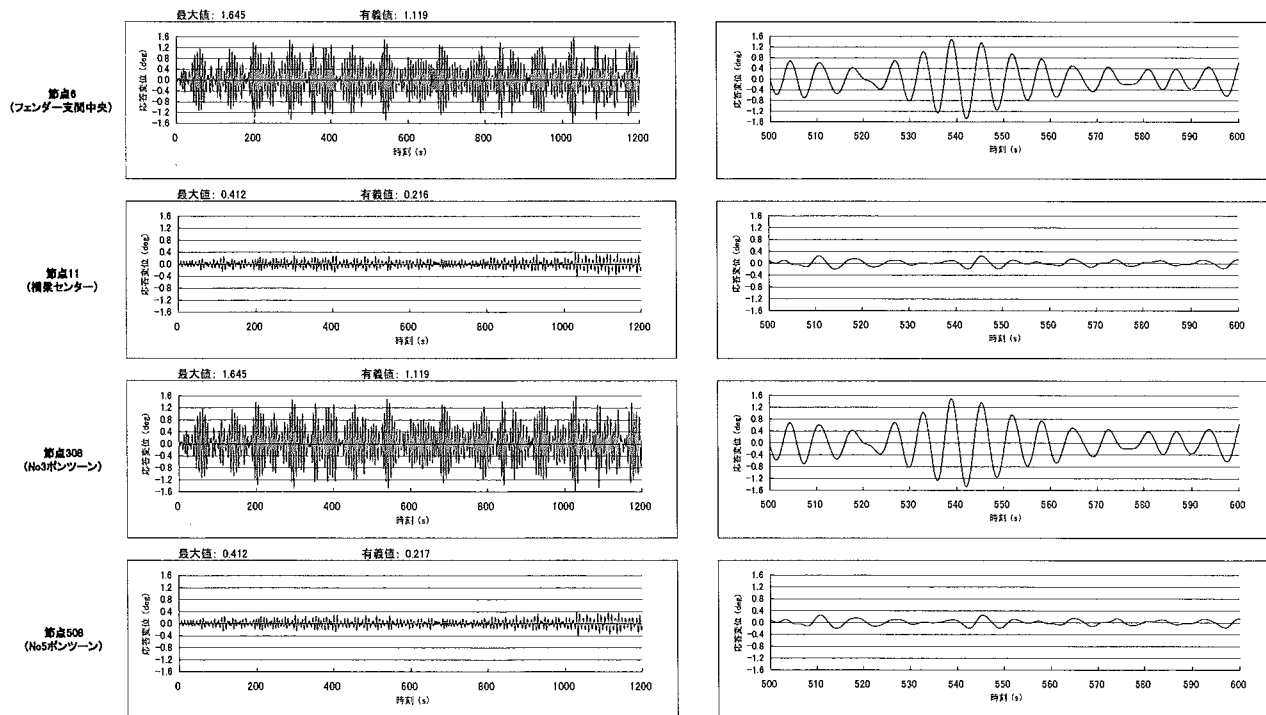


図-4.2.26 時刻歴応答解析結果：宮古・鉛直方向 (Heave)

応答加速度



応答変位



不規則波力(入力外力)

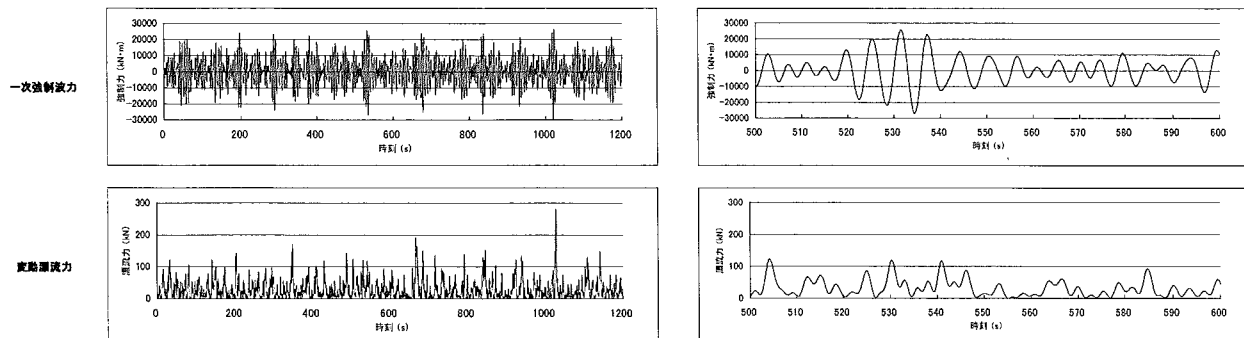
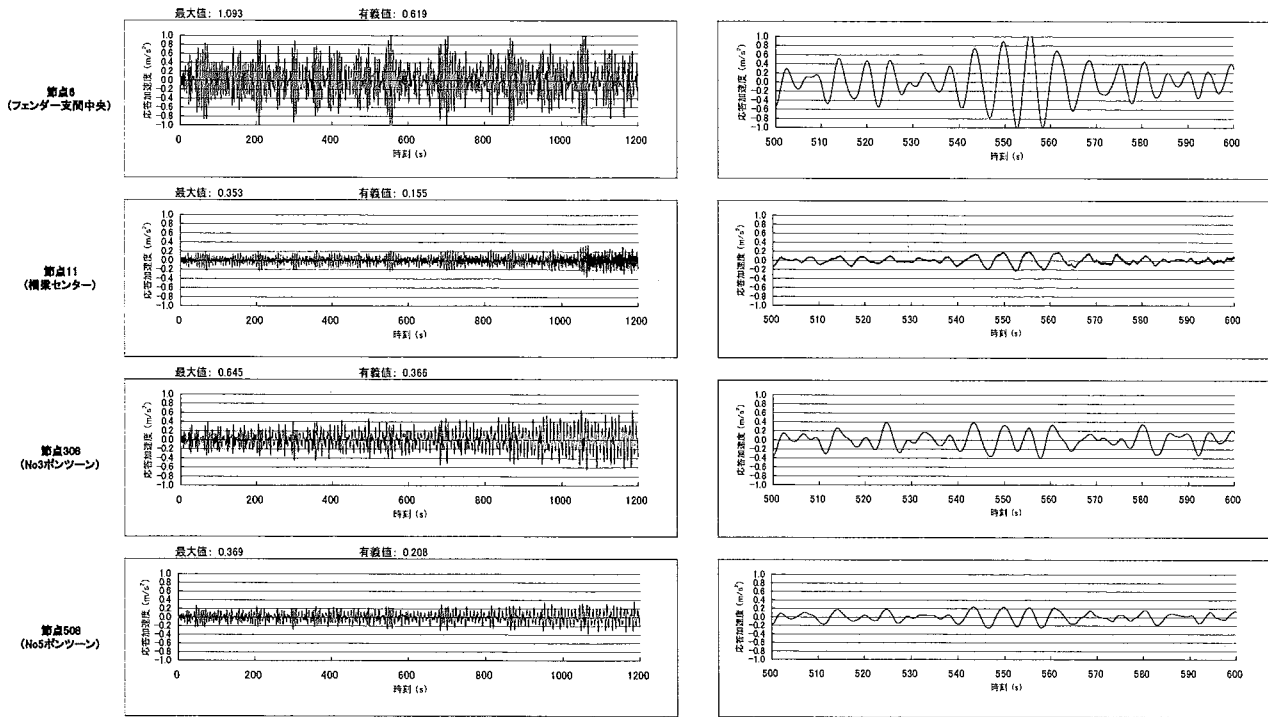
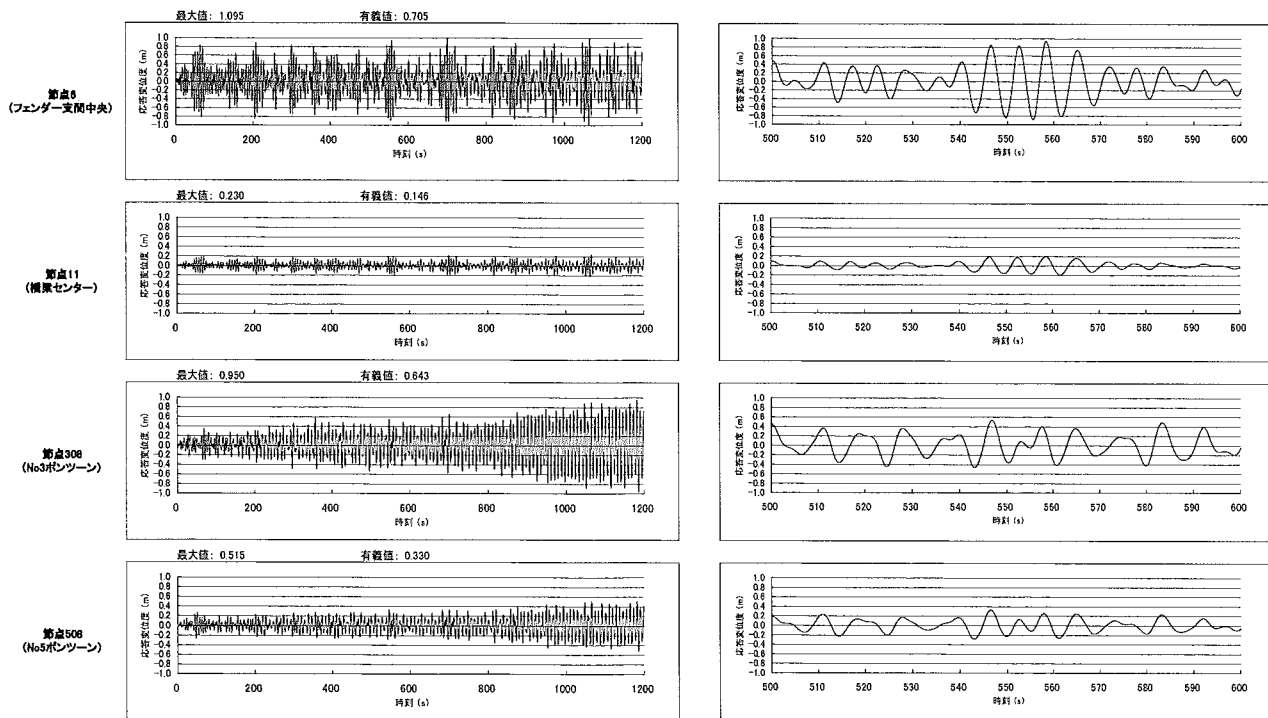


図-4.2.27 時刻歴応答解析結果：宮古・橋軸回転 (Roll)

応答加速度



応答変位



不規則波力(入力外力)

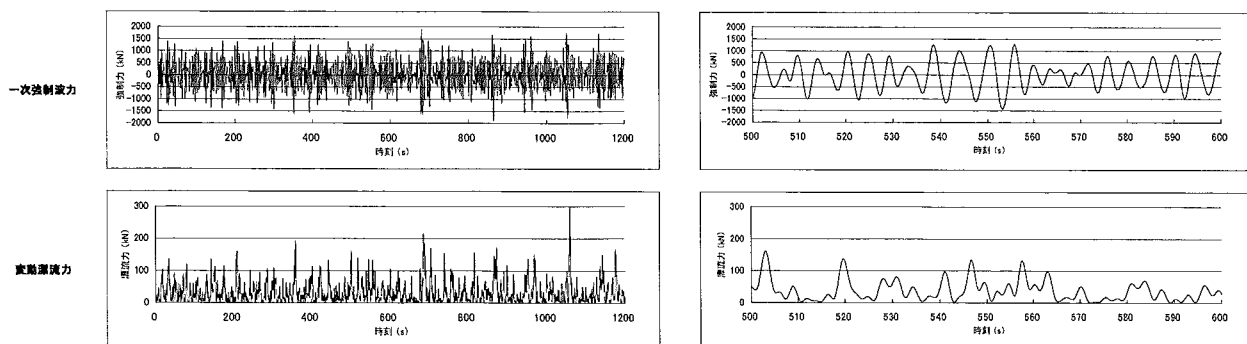
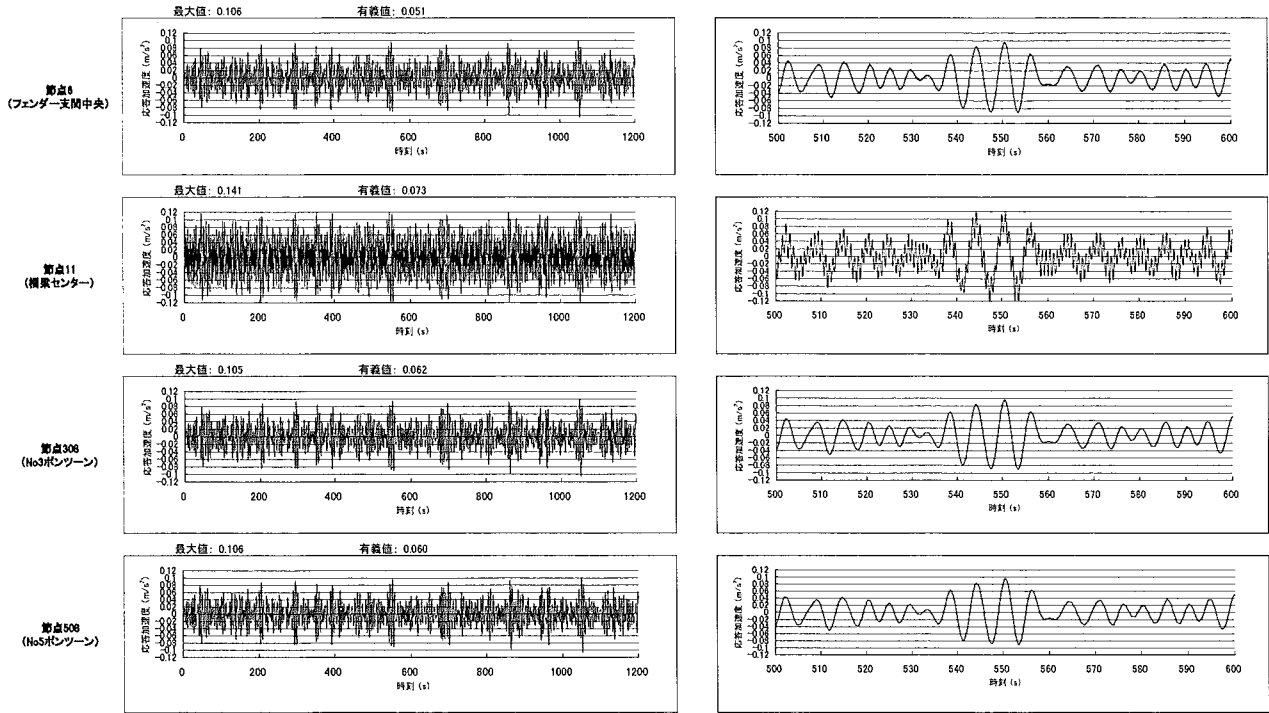
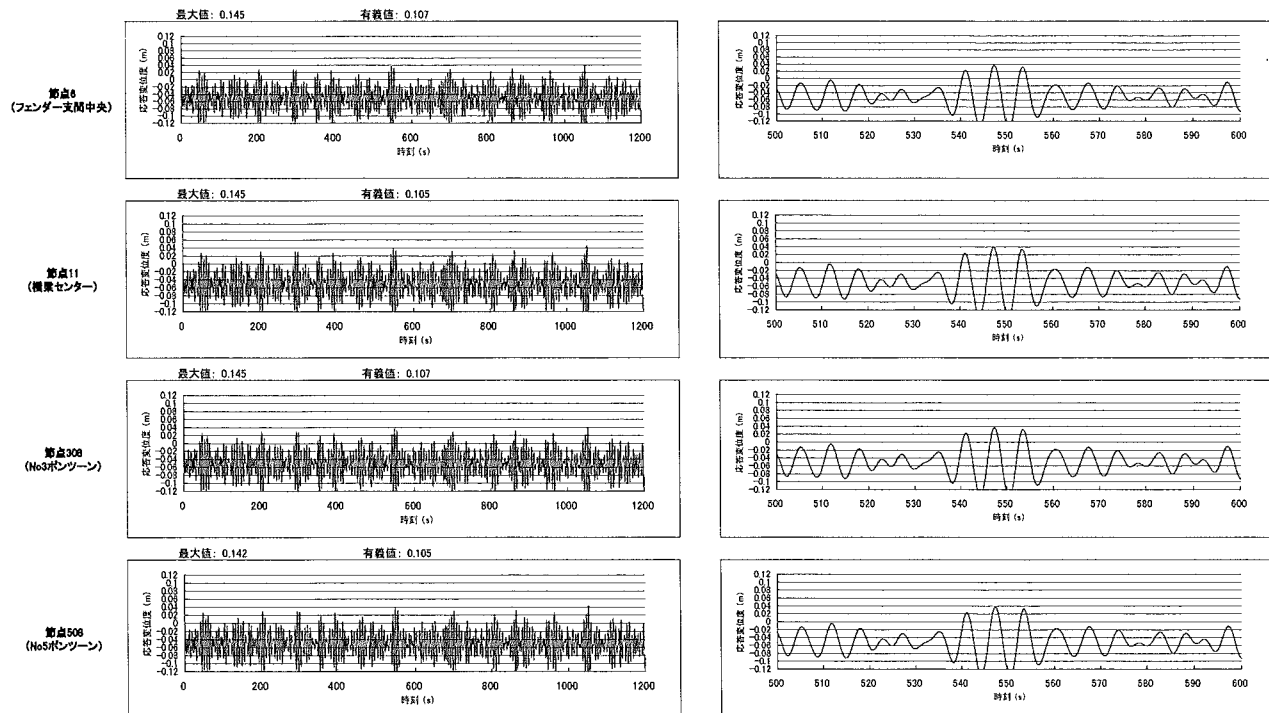


図-4.2.28時刻歴応答解析結果：浜金谷・直角方向 (Sway)

応答加速度



応答変位



不規則波力(入力外力)

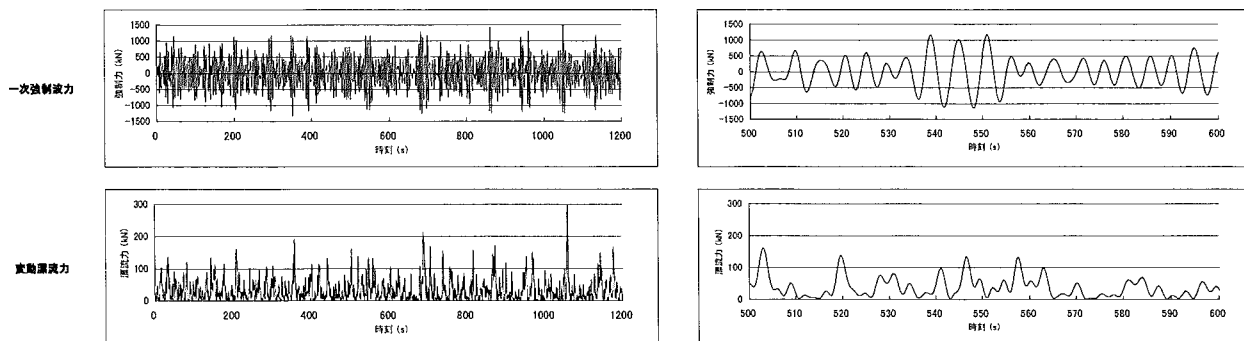
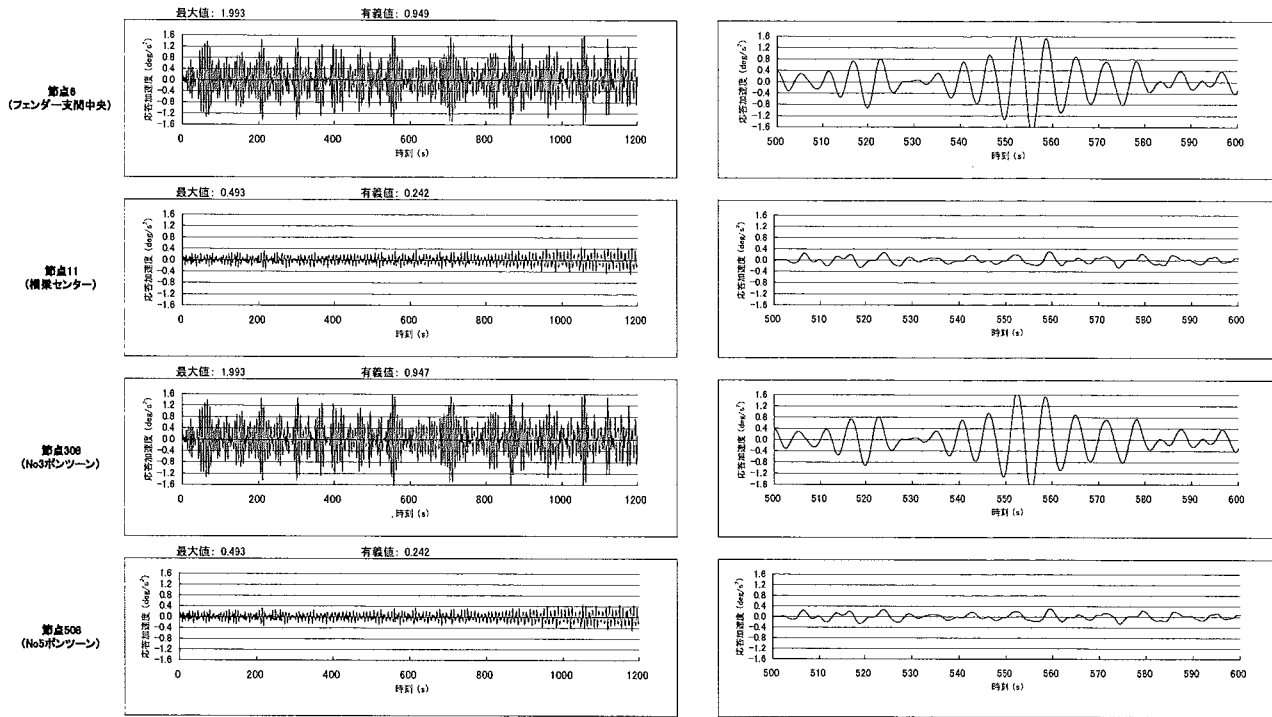
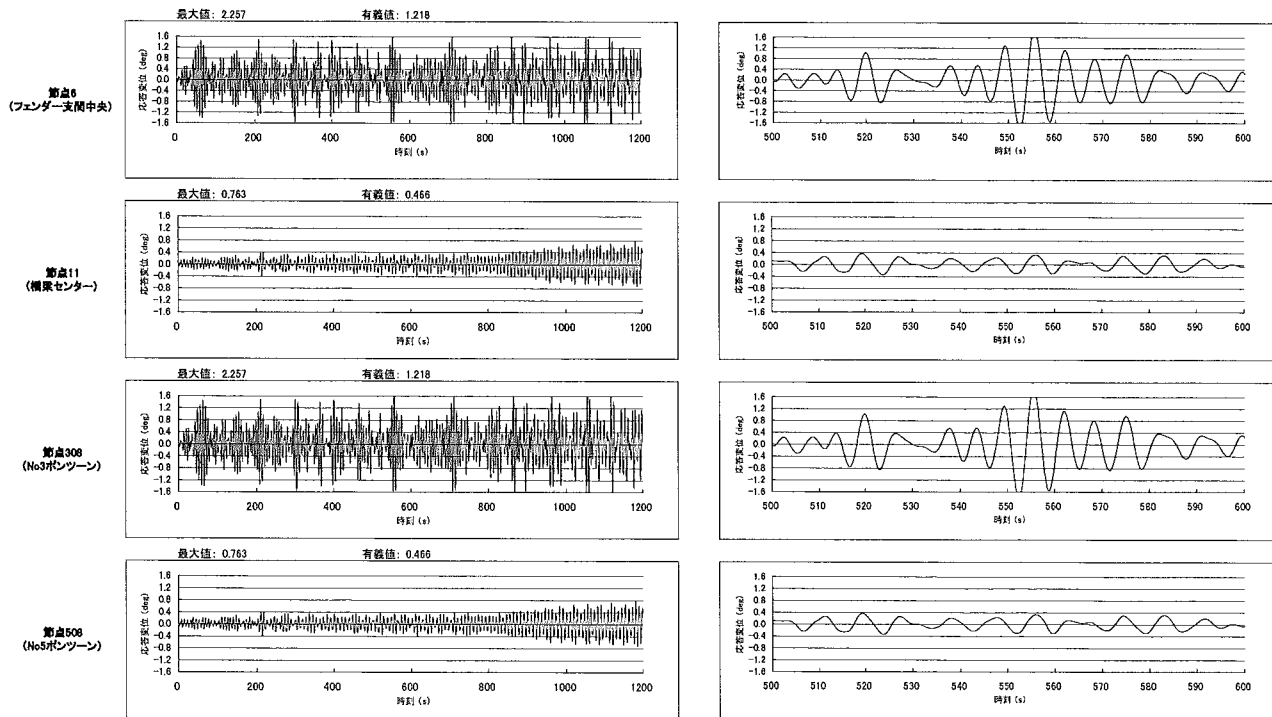


図-4.2.29時刻歴応答解析結果：浜金谷・鉛直方向 (Heave)

応答加速度



応答変位



不規則波力(入力外力)

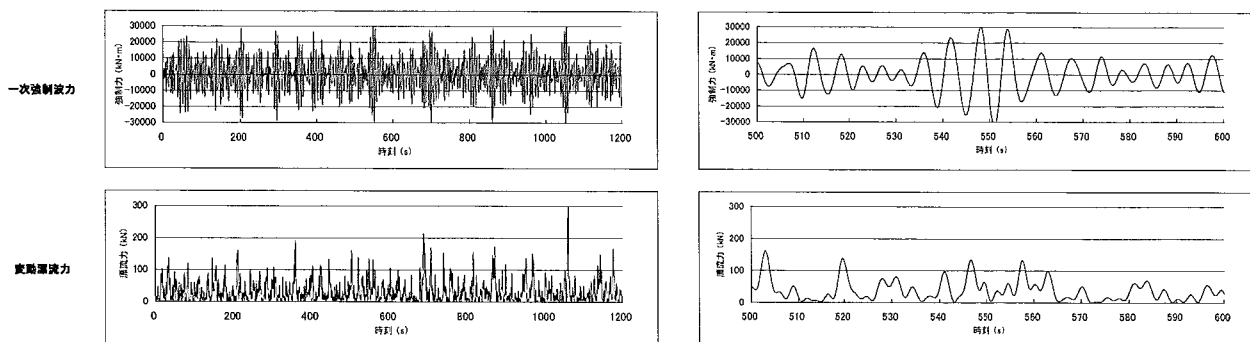
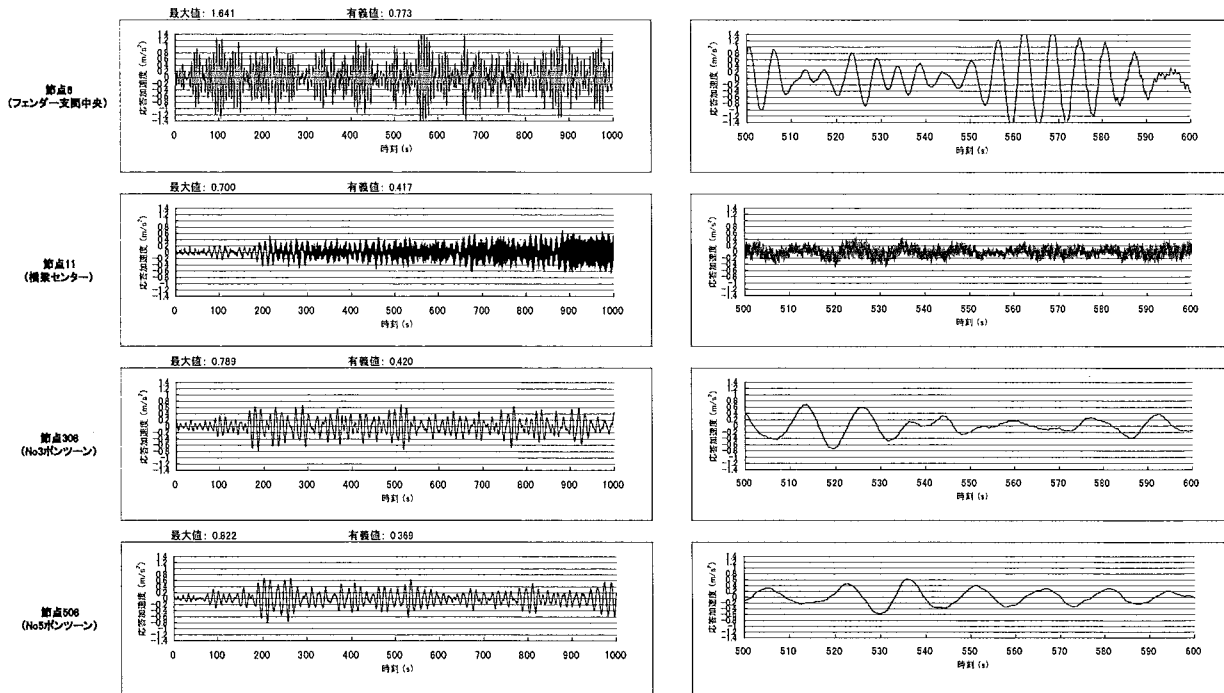


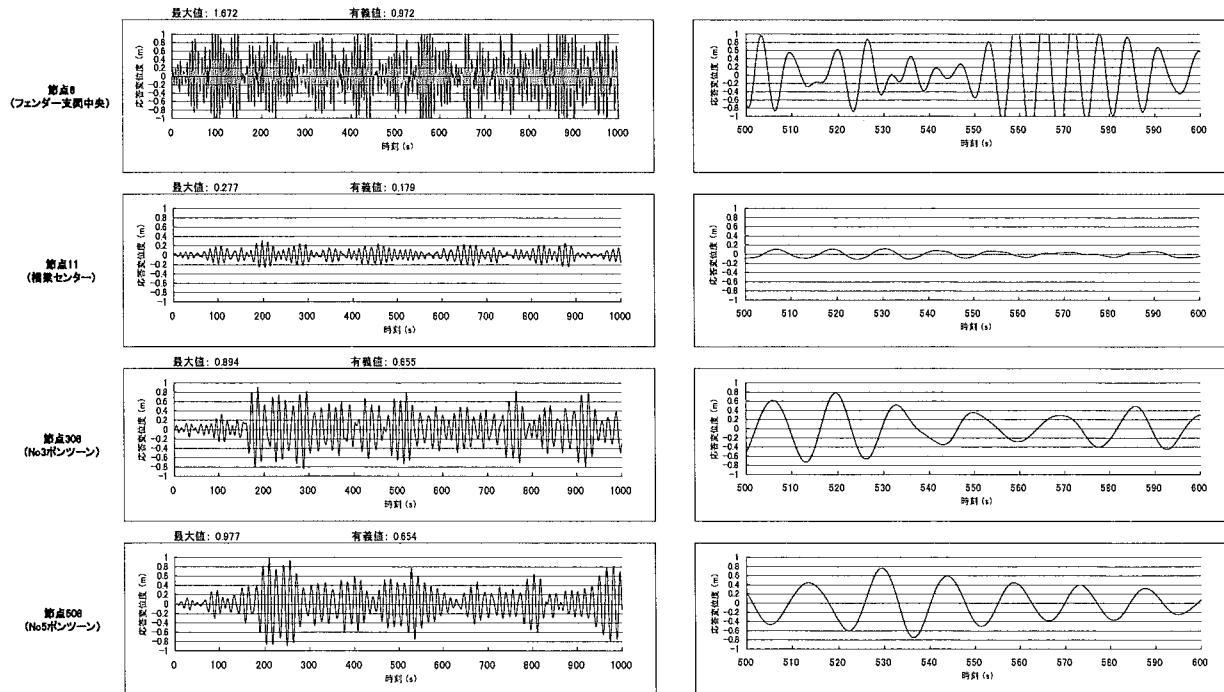
図-4.2.30 時刻歴応答解析結果：浜金谷・橋軸回転 (Ro11)

※ 時刻1000s以上は解が発散するため、0～1000sまでを図化

応答加速度



応答変位



不規則波力(入力外力)

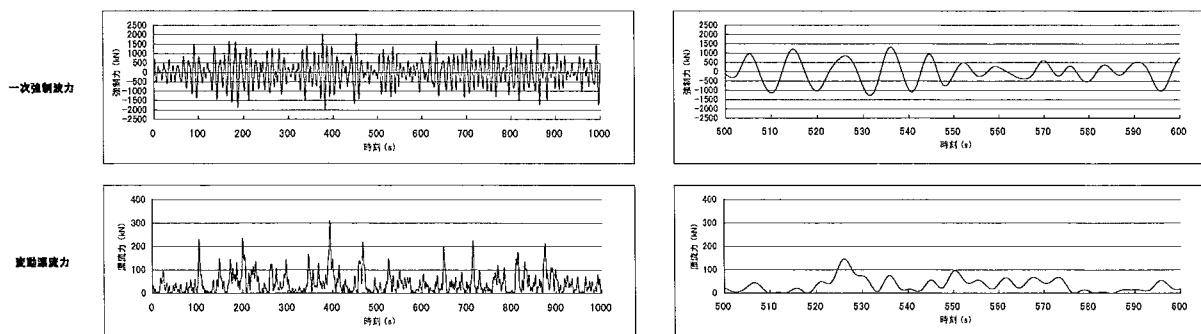
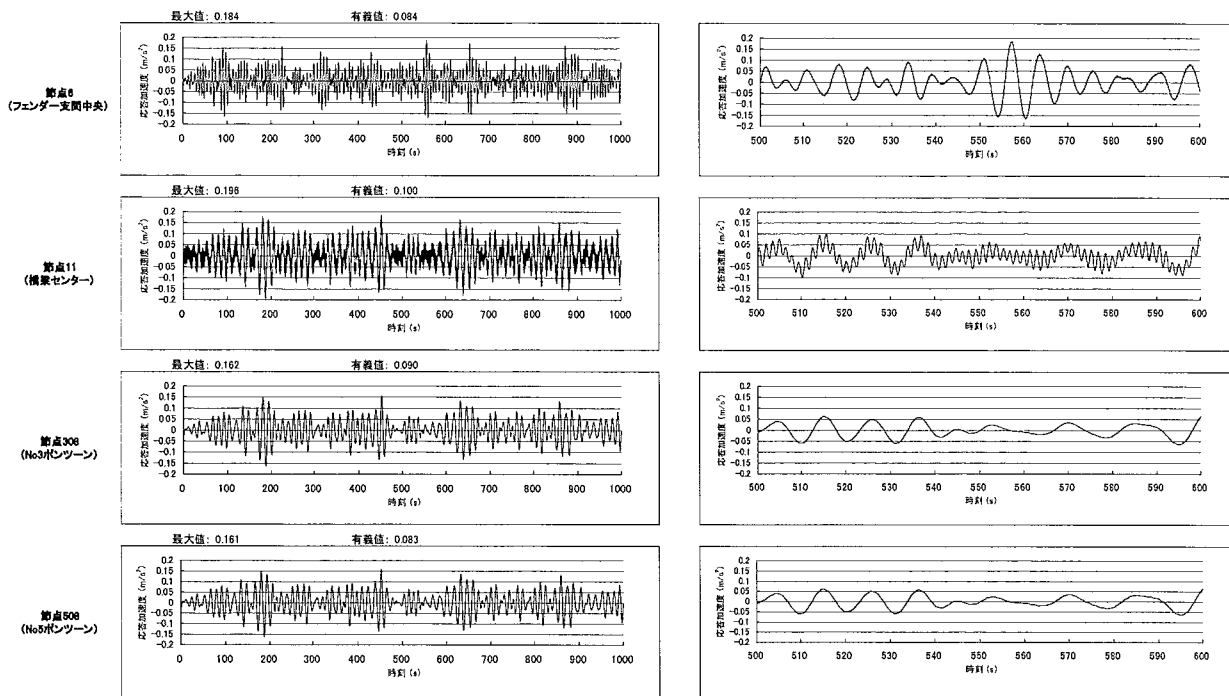


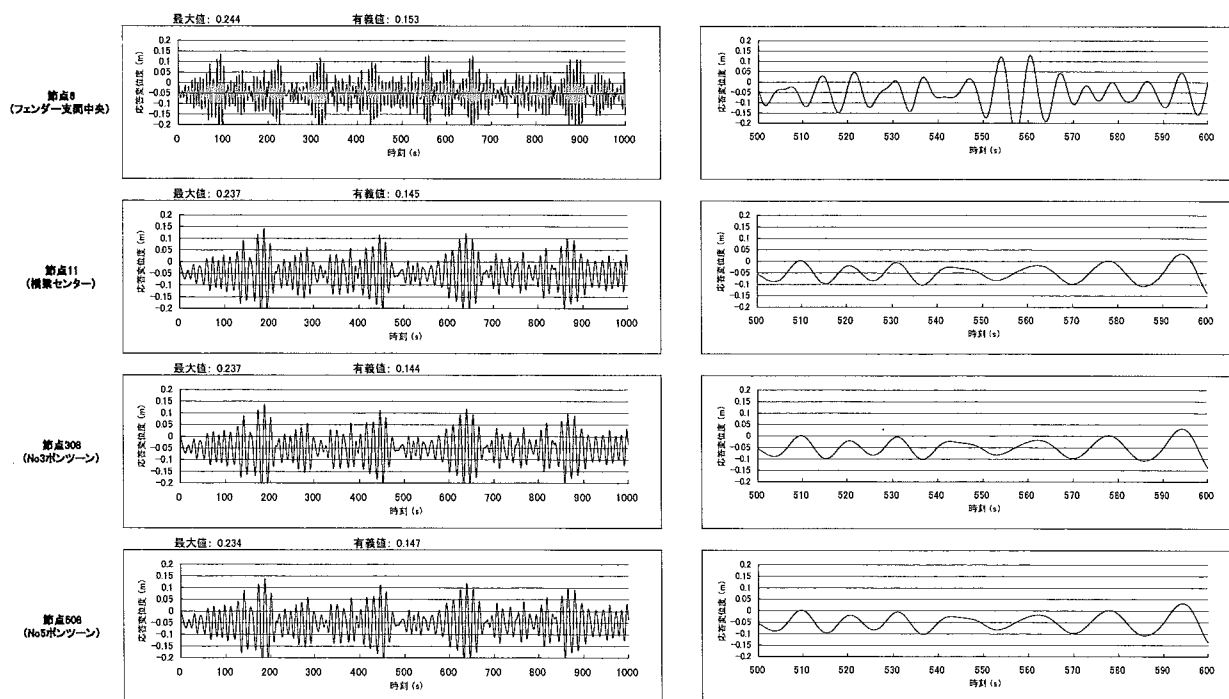
図-4.2.31 時刻歴応答解析結果: 下田・直角方向 (Sway)

※ 時刻1000s以上は解が発散するため、0~1000sまでを図化

応答加速度



応答変位



不規則波力(入力外力)

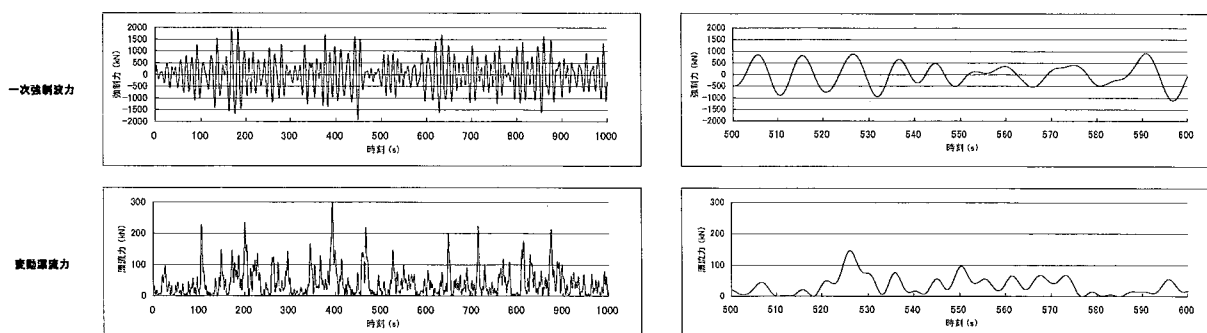
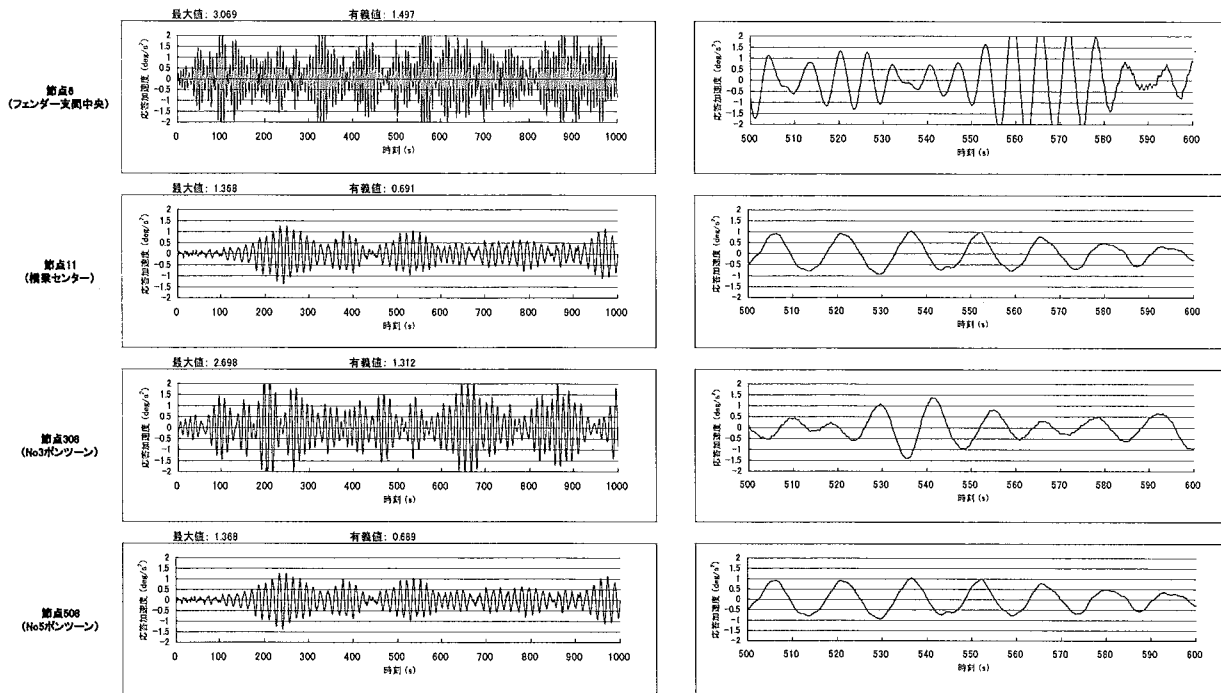


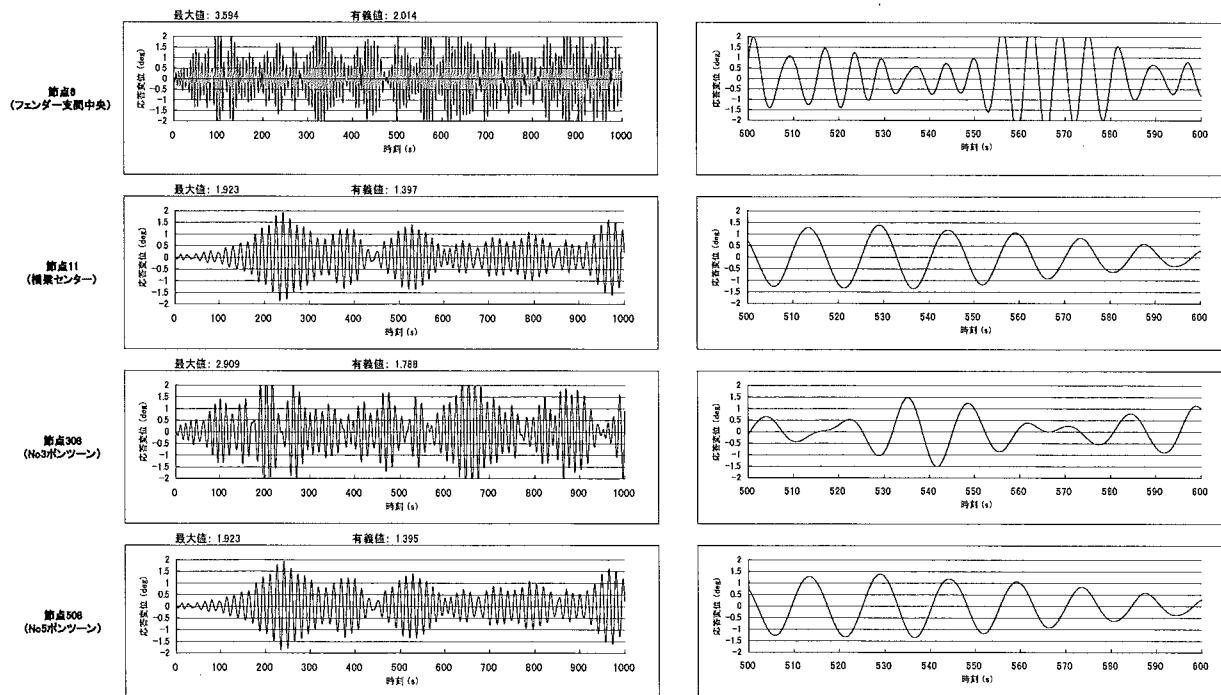
図-4.2.32時刻歴応答解析結果：下田・鉛直方向 (Heave)

※ 時刻1000s以上は解が発散するため、0~1000sまでを図化

応答加速度



応答変位



不規則波力(入力外力)

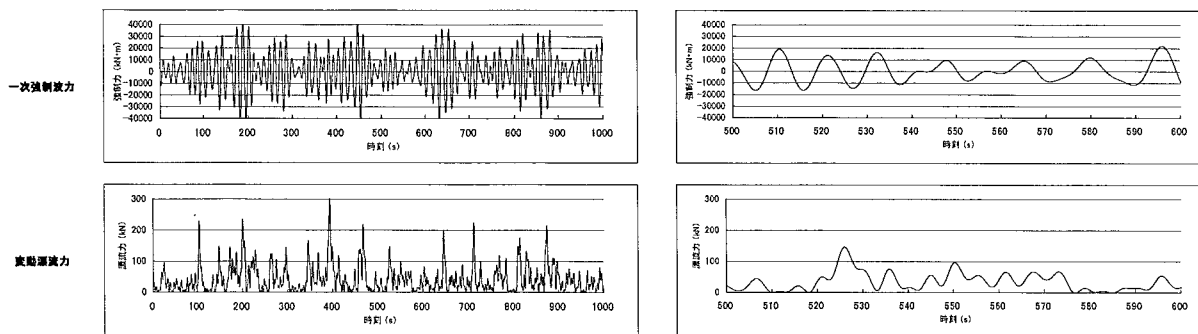
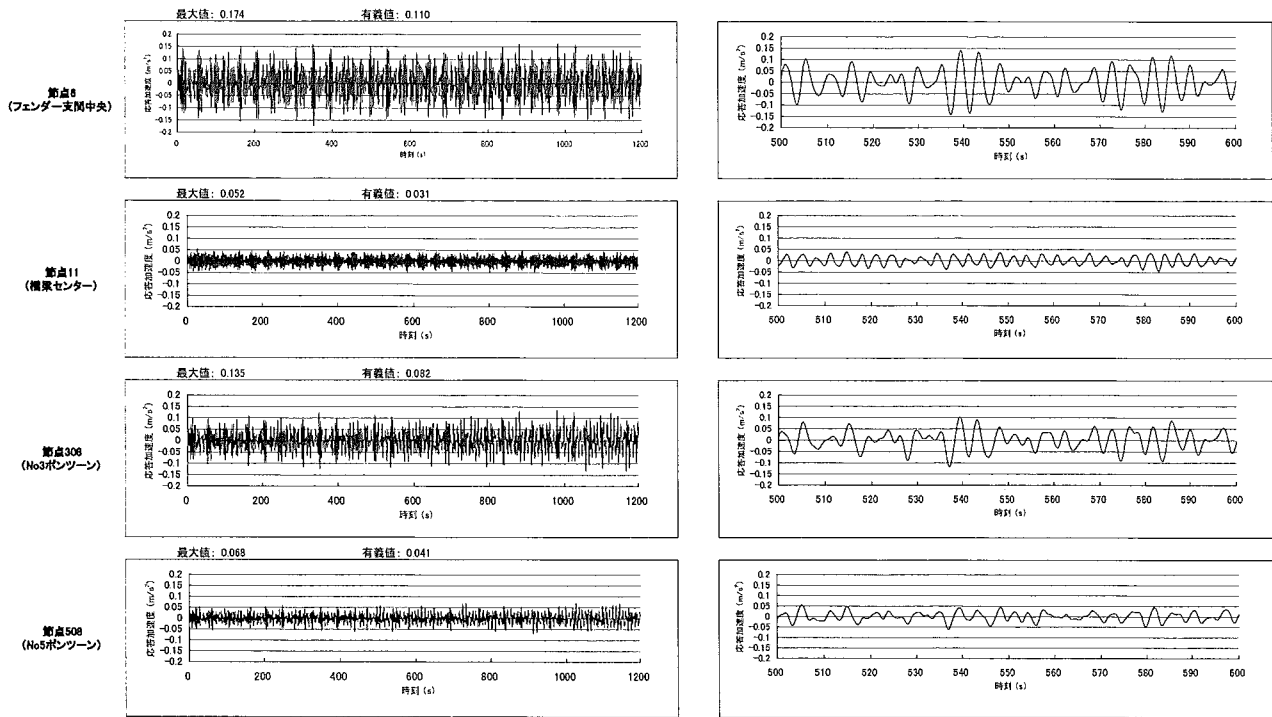
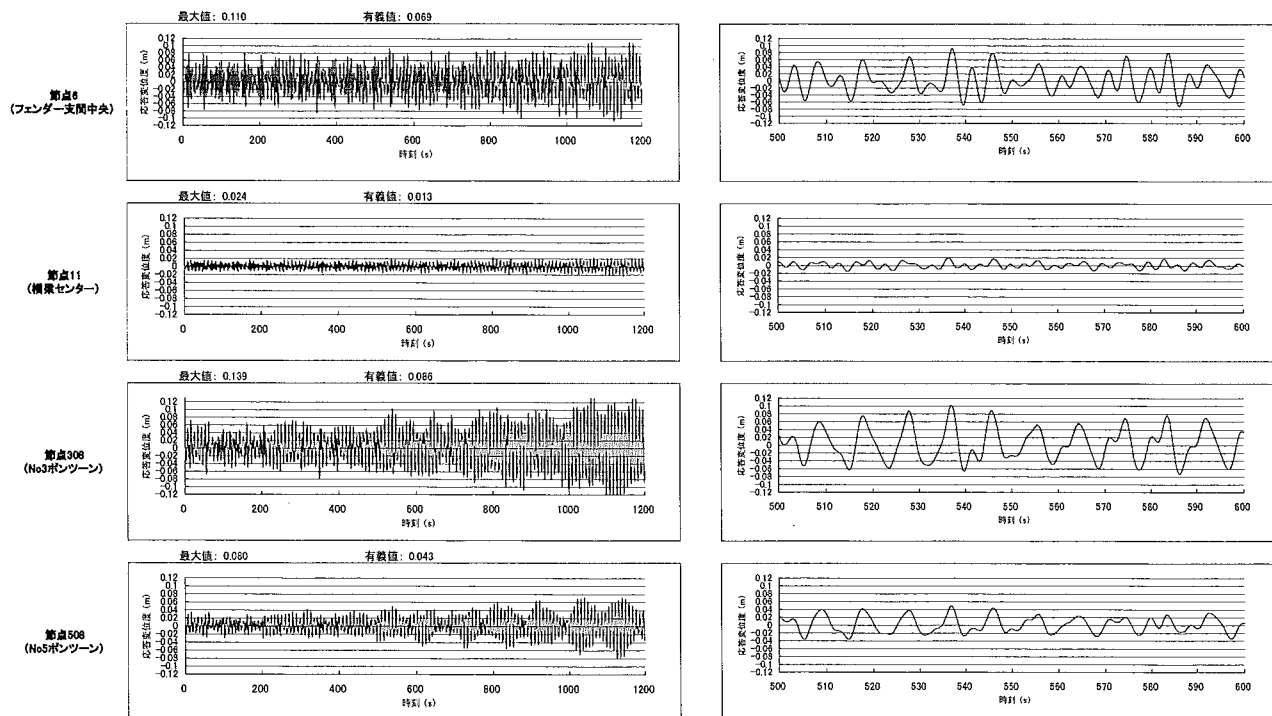


図-4.2.33 時刻歴応答解析結果：下田・橋軸回転 (Ro11)

応答加速度



応答変位



不規則波力(入力外力)

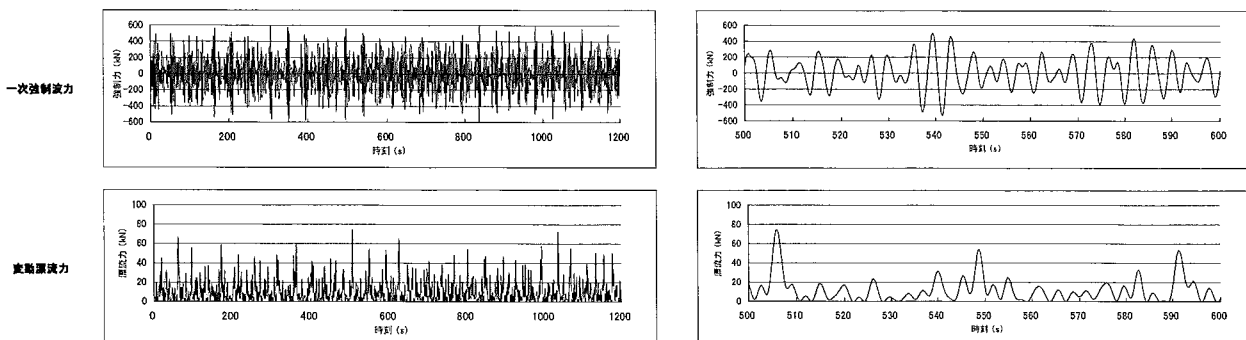
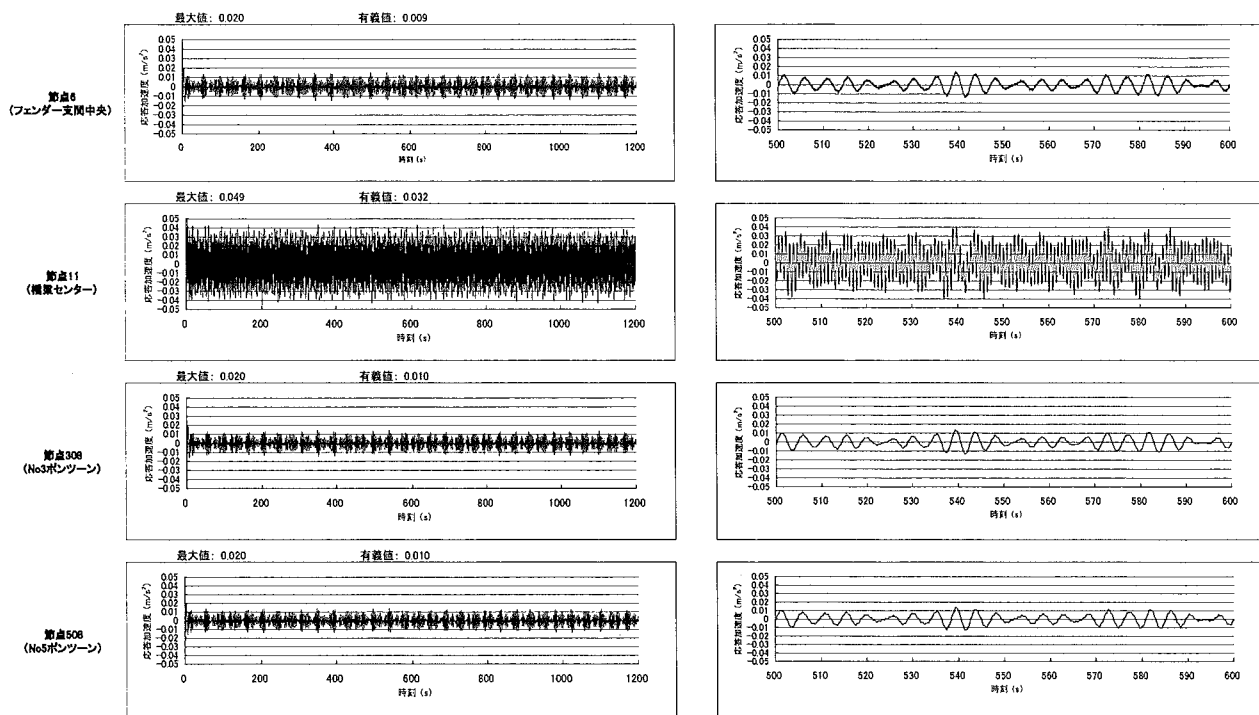
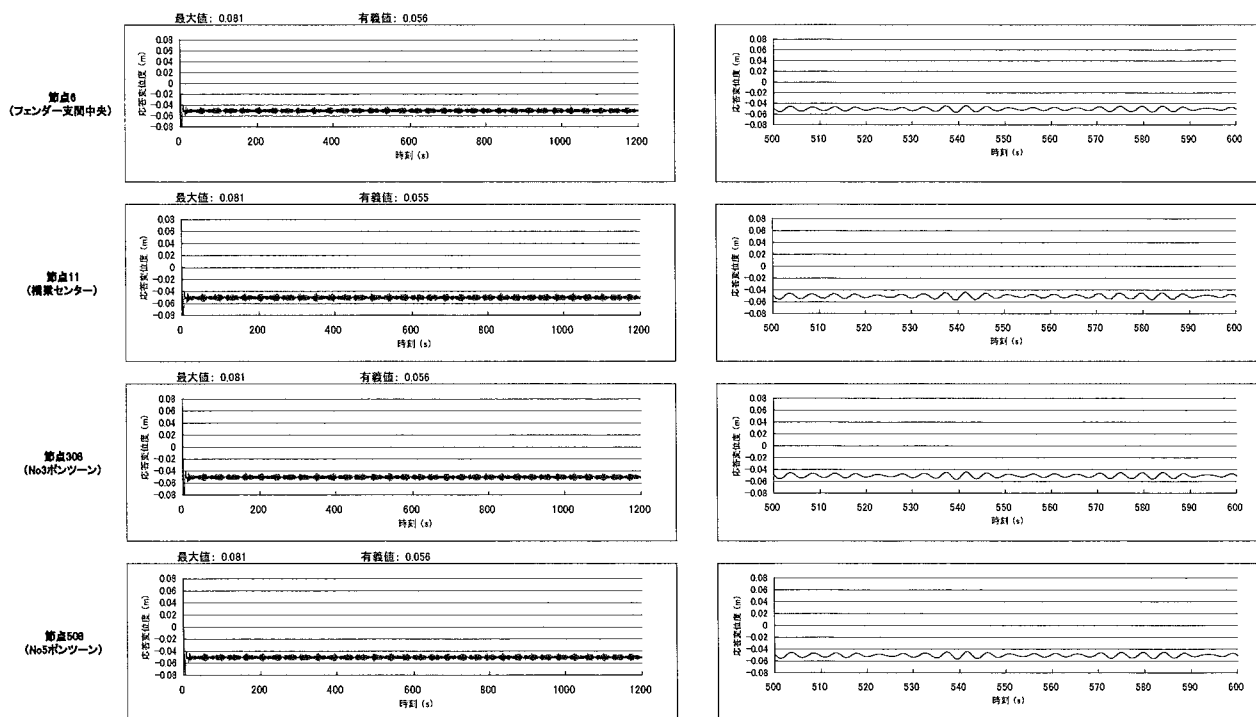


図-4.2.34 時刻歴応答解析結果：神戸・直角方向（Sway）

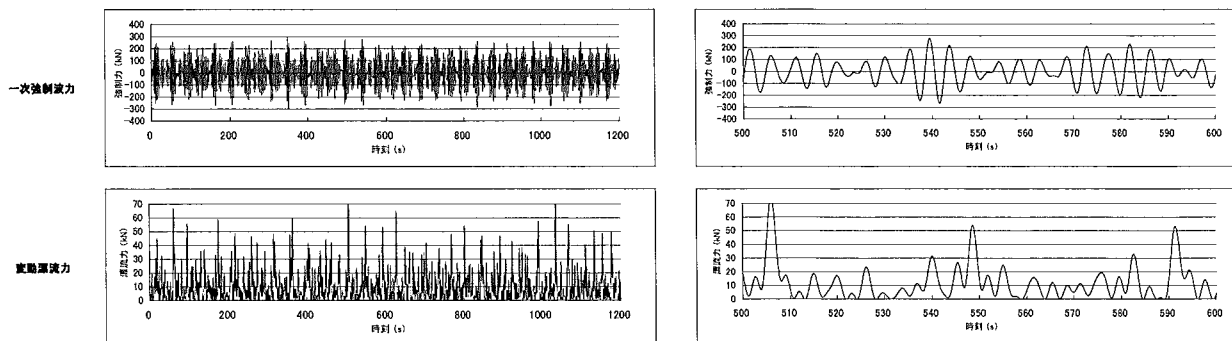
応答加速度



応答変位

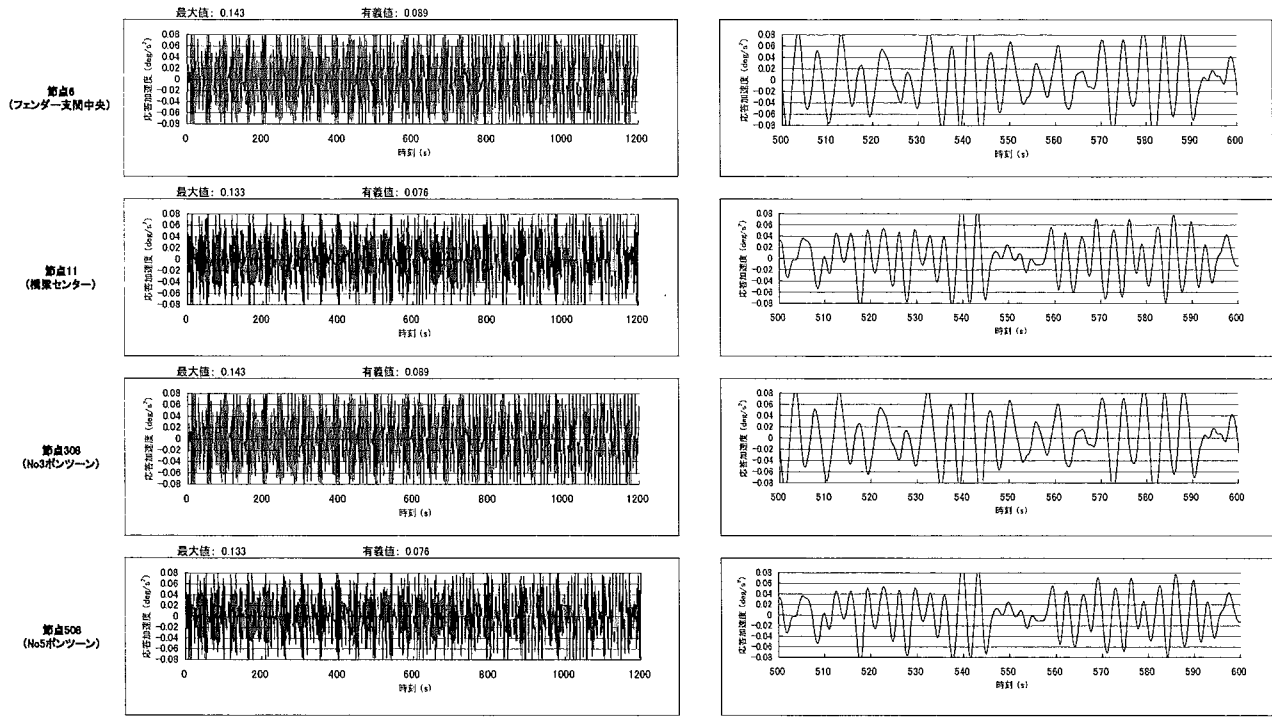


不規則波力(入力外力)

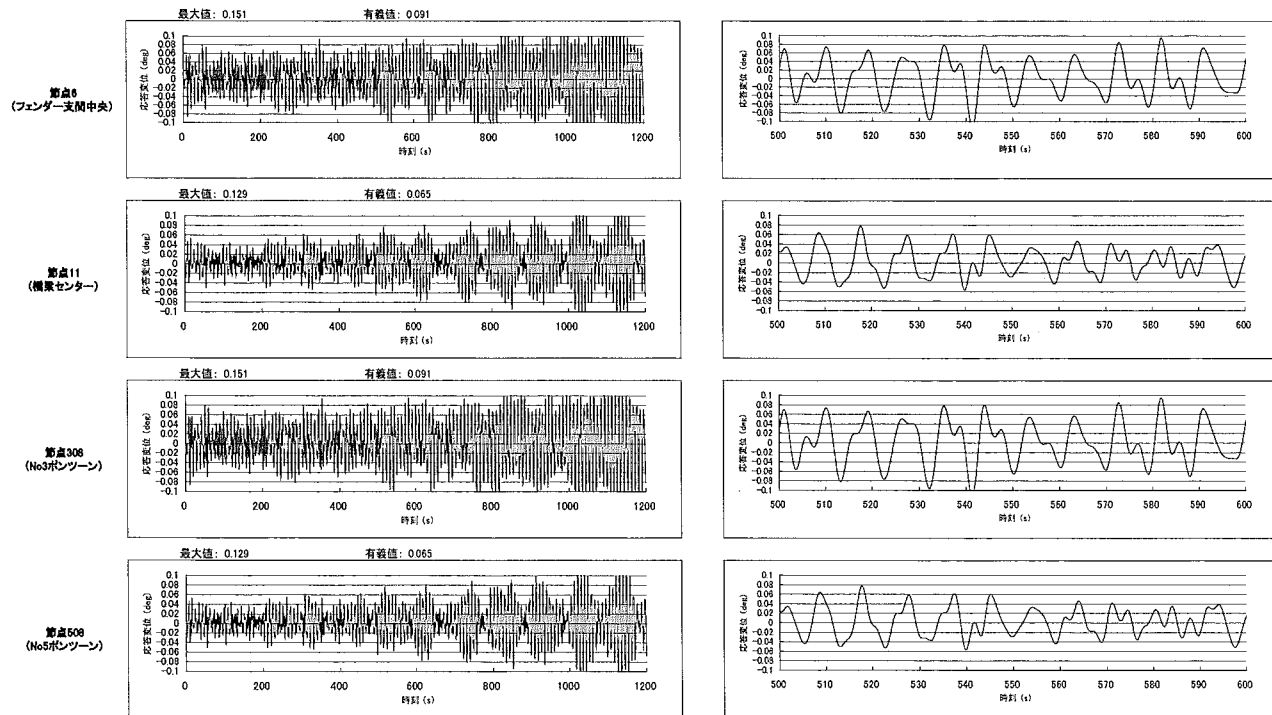


図一4.2.35 時刻歴応答解析結果：神戸・鉛直方向 (Heave)

応答加速度



応答変位



不規則波力(入力外力)

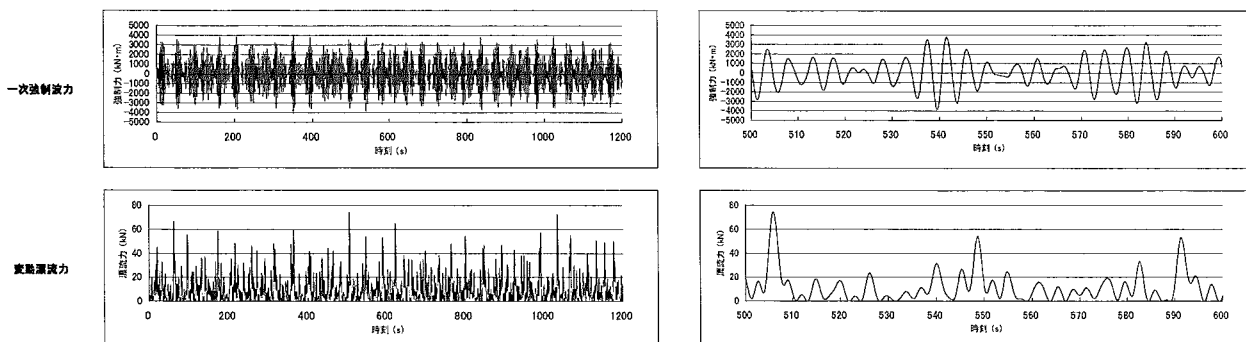
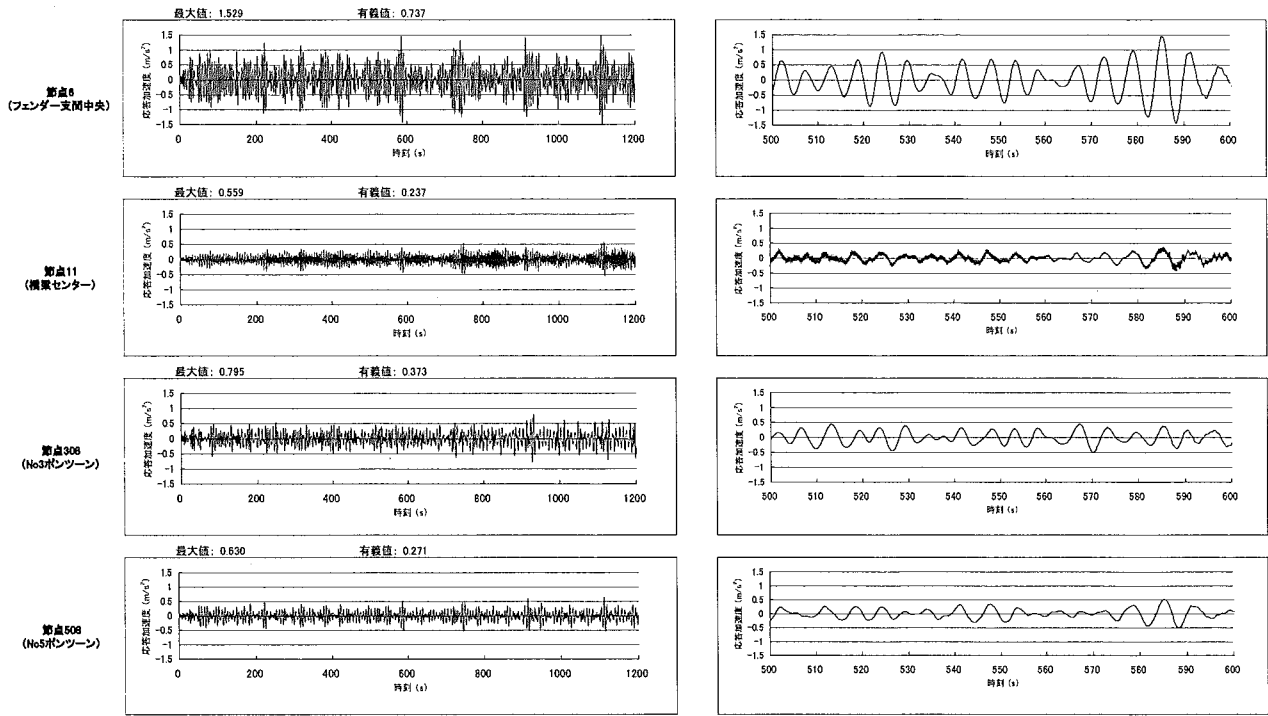
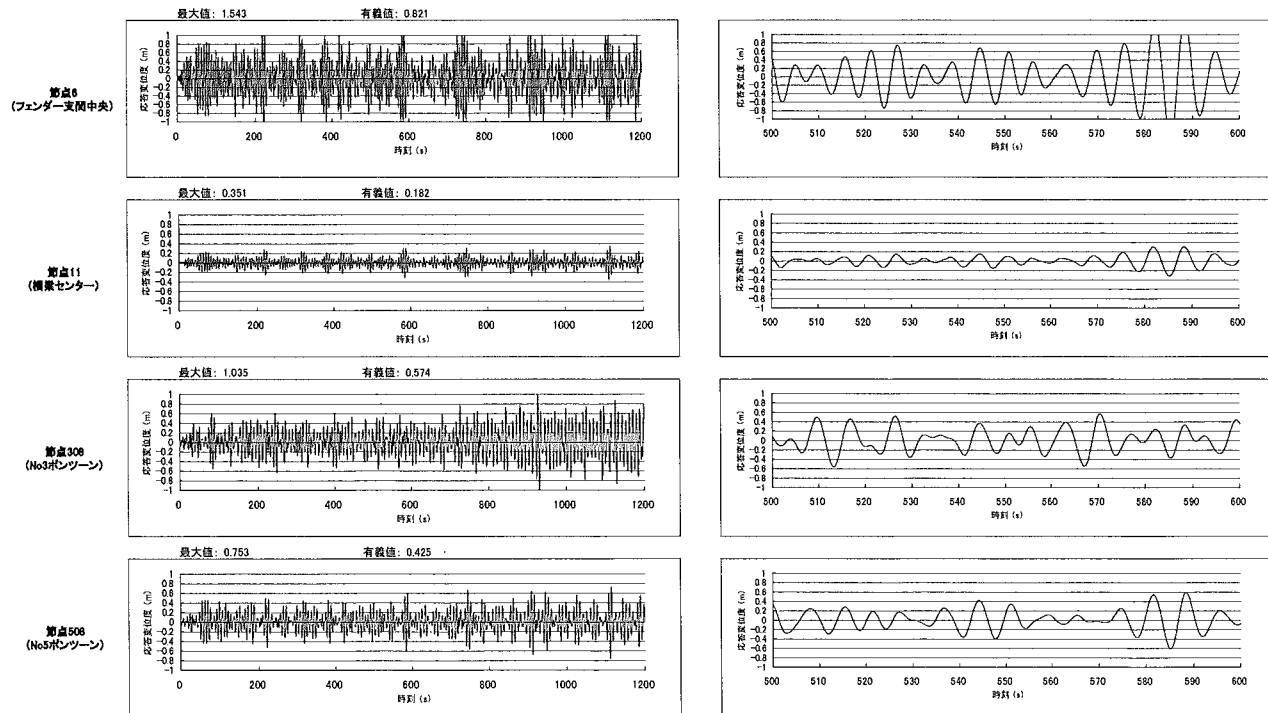


図-4.2.36 時刻歴応答解析結果：神戸・橋軸回転 (Roll)

応答加速度



応答変位



不規則波力(入力外力)

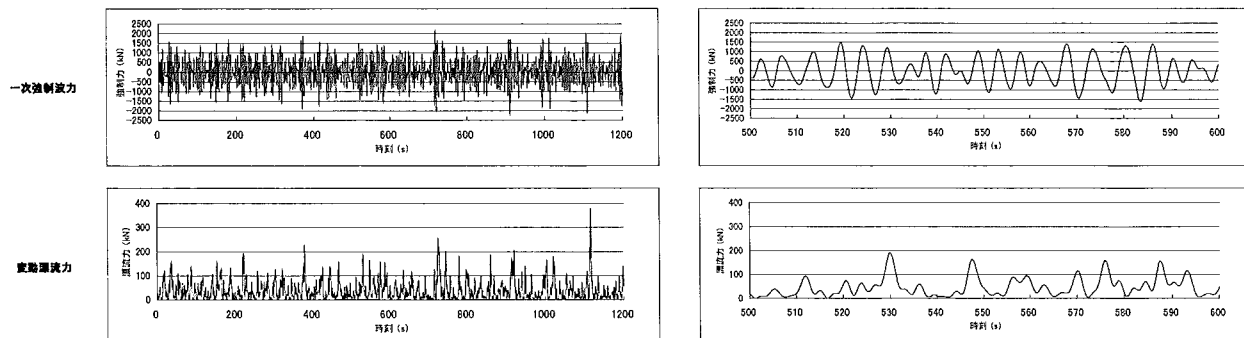
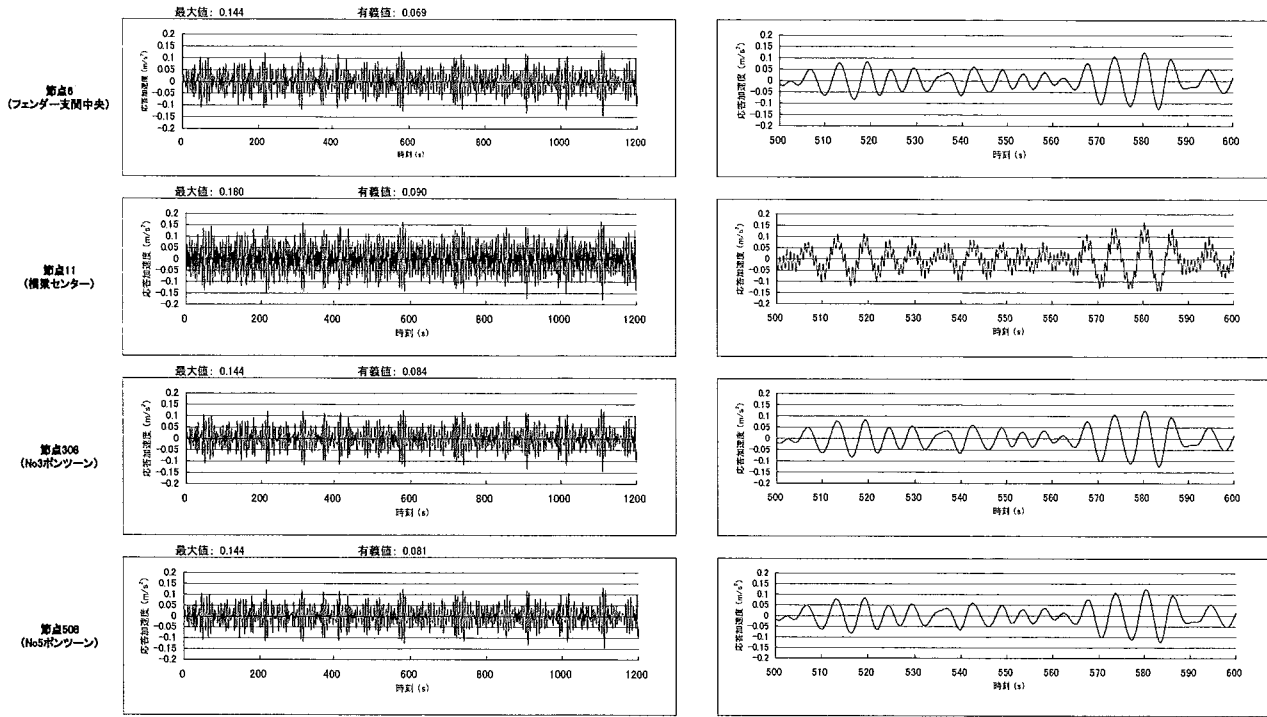
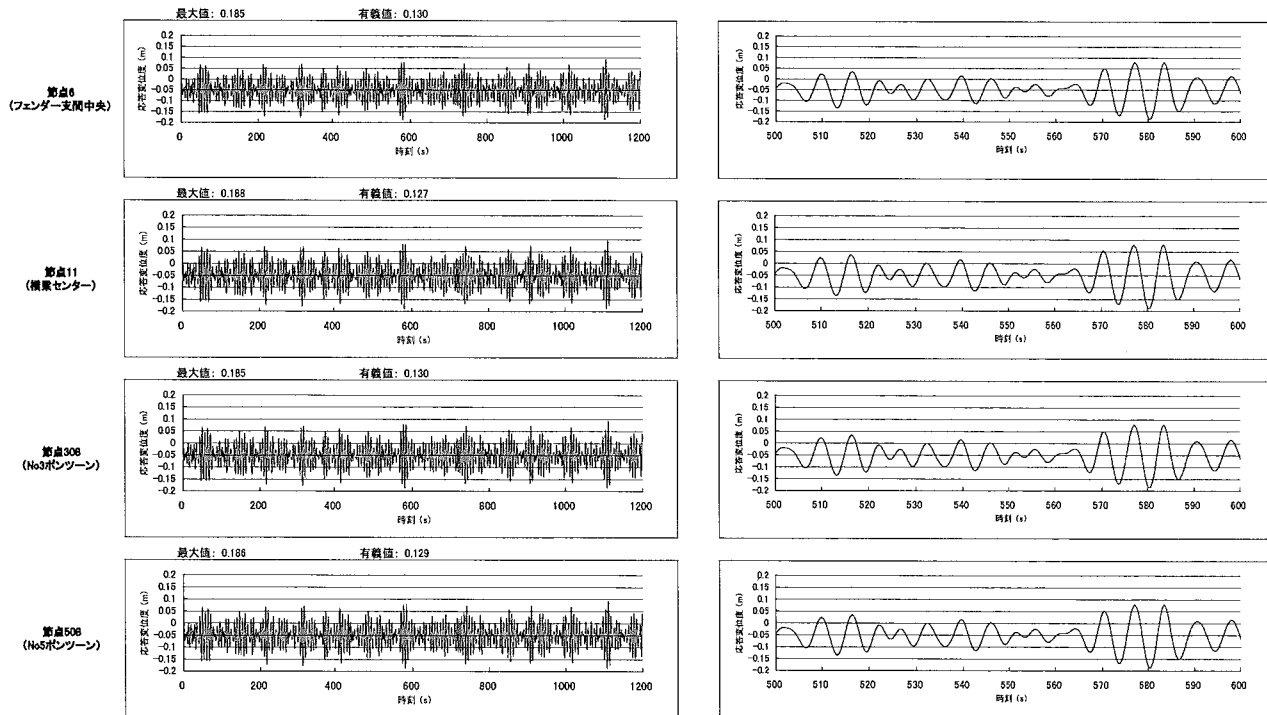


図-4.2.37 時刻歴応答解析結果：伊王島・直角方向 (Sway)

応答加速度



応答変位



不規則波力(入力外力)

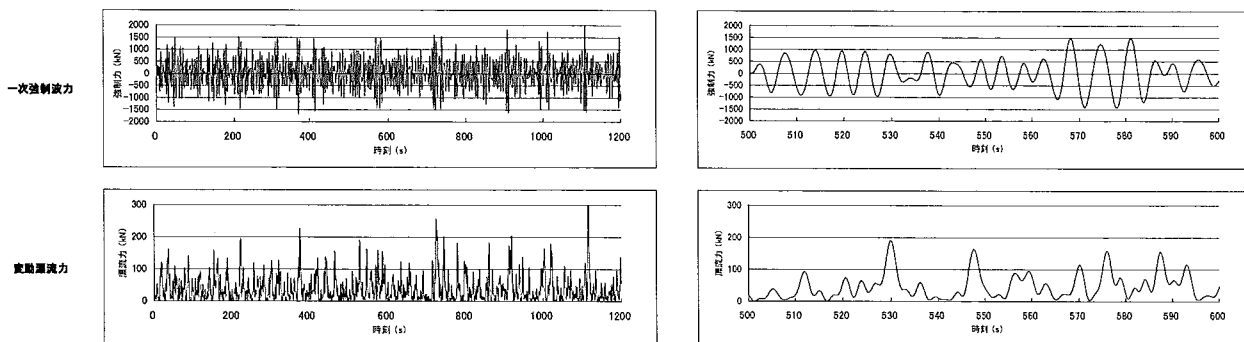
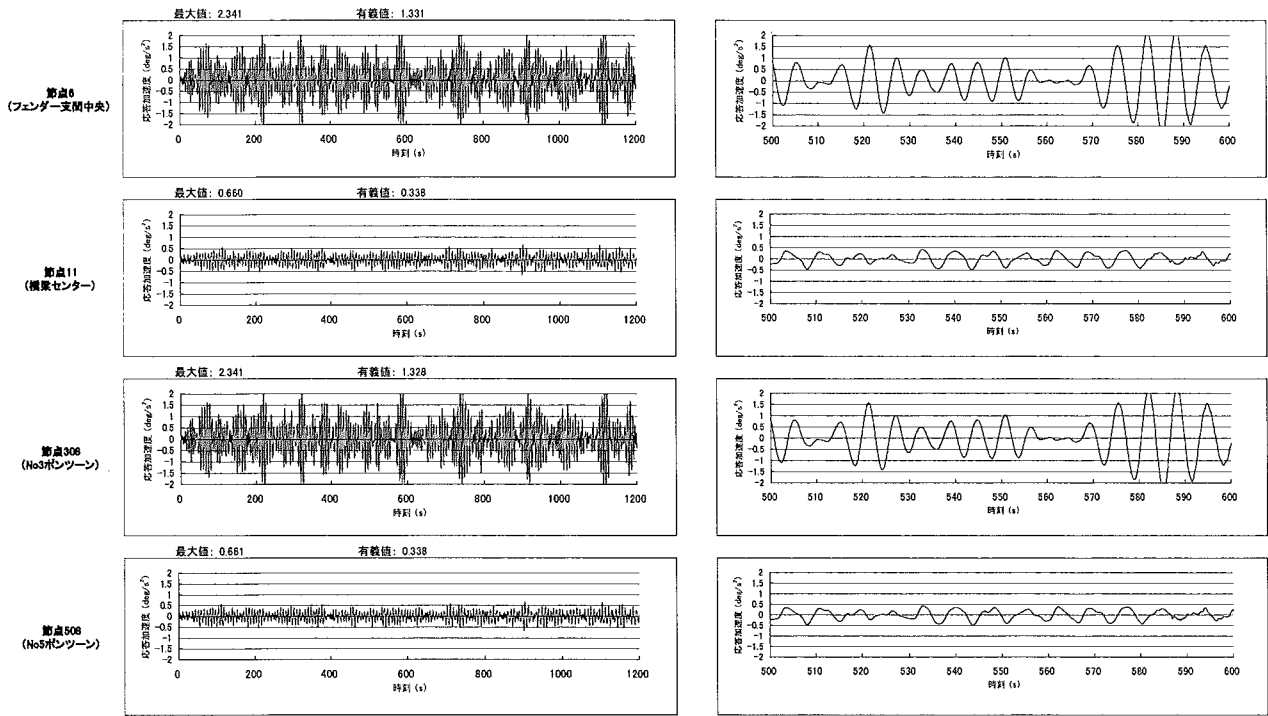
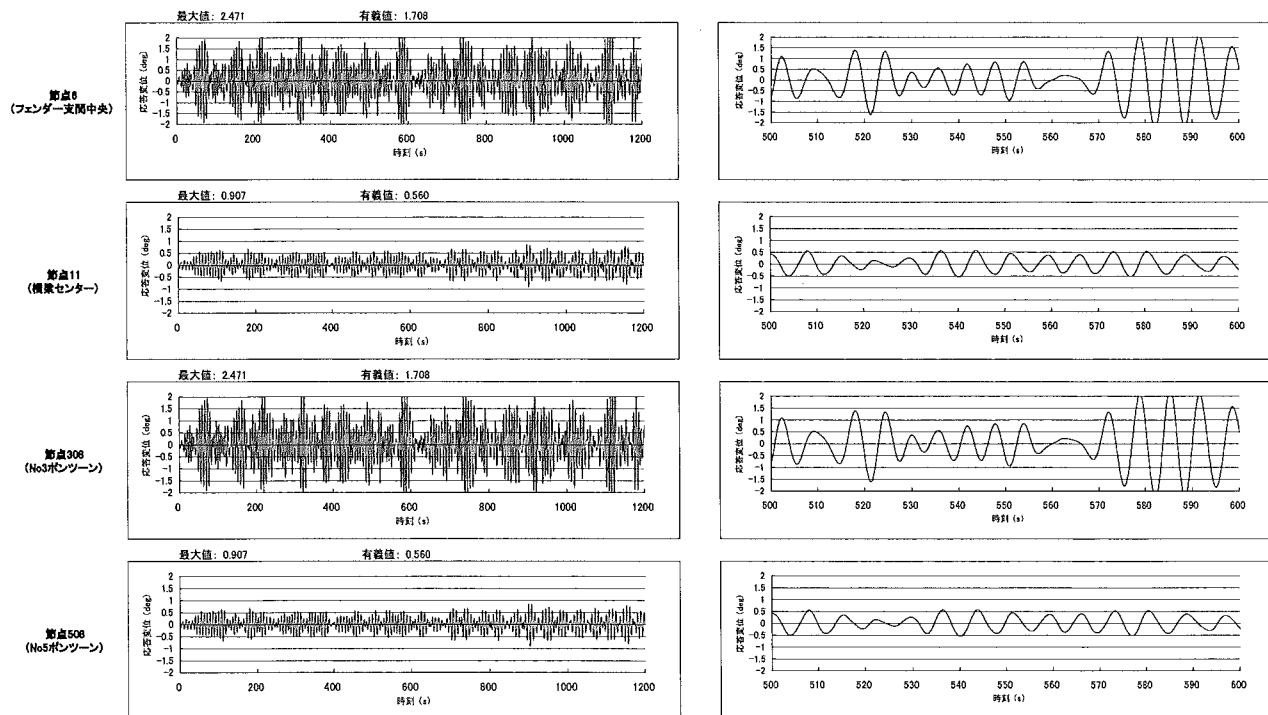


図-4.2.38 時刻歴応答解析結果：伊王島・鉛直方向（Heave）

応答加速度



応答変位



不規則波力(入力外力)

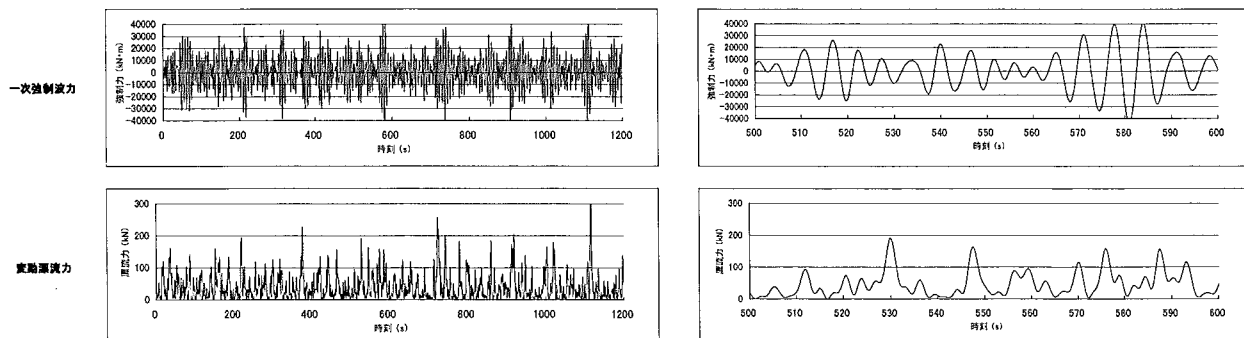


図-4.2.39 時刻歴応答解析結果：伊王島・橋軸回転 (Roll)

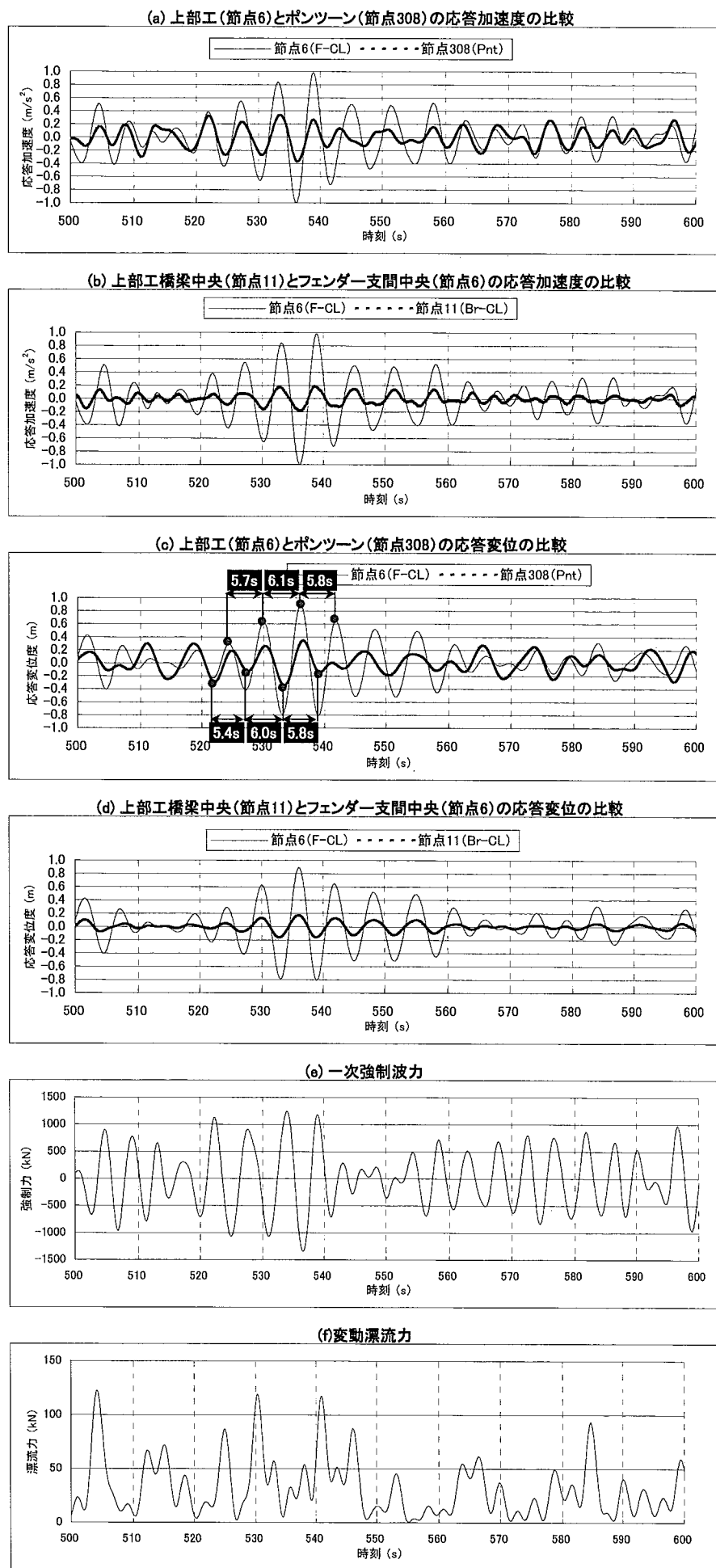


図-4.2.40 応答加速度・応答変位の比較 (宮古・Sway)

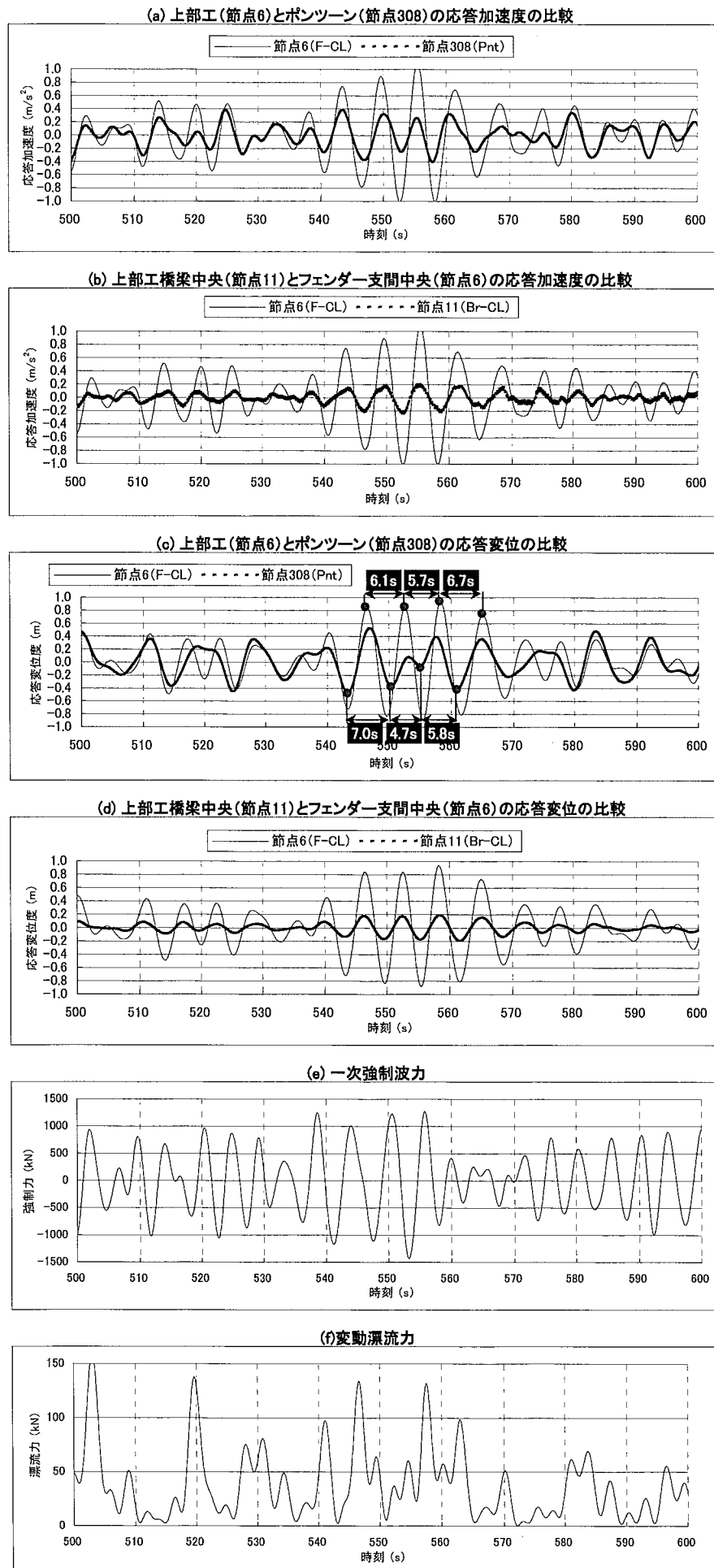


図-4.2.41 応答加速度・応答変位の比較(浜金谷・Sway)

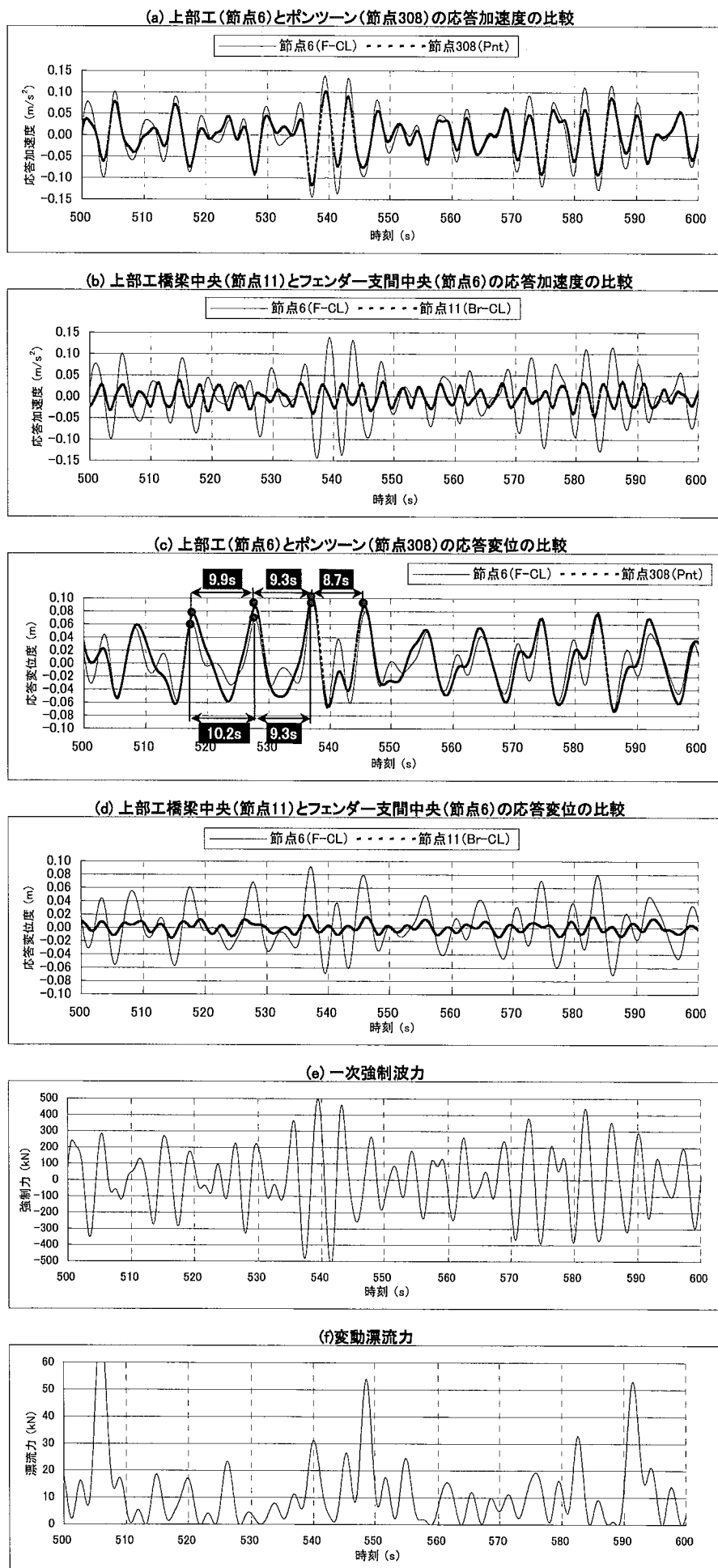


図-4.2.42 応答加速度・応答変位の比較 (神戸・Sway)

(3) 適用性の判定

節点 6 (フェンダー支間中央の上部工節点) における時刻歴応答解析の結果を表-4.2.7 に示す。同表から、時刻歴応答解析により適用性を検討した 7 地点のうち、宮古、浜金谷および神戸の 3 地点において、加速度の許容値 (水平・鉛直方向: 0.6m/s^2 、回転方向: 2.0deg/s^2) を満足することとなった (図-4.2.43)。

【浮体橋の適用性を有する箇所】

- ①宮古……適用できる
- ②浜金谷……適用できる
- ③下田*……適用できない
- ④神戸……適用できる
- ⑤志布志*……適用できない
- ⑥伊王島*……適用できない
- ⑦藍島*……適用できない

*周波数応答解析では適用性が得られなかった箇所

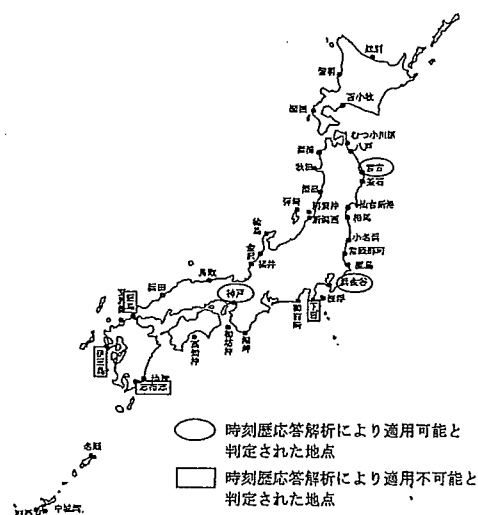


図-4.2.43 加速度の許容値を満足する地点
(3/40 地点)

表-4.2.8 に、周波数応答解析と時刻歴応答解析との節点 6 における直角方向の応答加速度を比較した結果を示す。同表から、係留形の非線形性を考慮した時刻歴応答解析による応答は周波数応答解析による応答に比べ 1~15%大きくなる程度であり、周波数応答解析で適用性が得られなかった下田、志布志、伊王島、藍島は、時刻歴応答解析によっても適用性が認められず、ほぼ同様な傾向を示すことがわかる。これは、時刻歴応答解析におけるフェンダー係留 (節点 11) およびカテナリー係留 (節点 308) の応答変位量が $0.2\sim0.5\text{m}$ 程度であり、図-4.2.19 および図-4.2.20 からわかるように明確な非線形性が現れる変形量以下の応答であったためと考えられる。

表-4.2.8 周波数応答と時刻歴応答との比較

	応答値 (m/s^2)		比率 H/F
	Fréq	Hist	
宮古	0.475	0.547	1.15
浜金谷	0.545	0.602	1.10
下田	0.764	0.795	1.04
神戸	0.105	0.106	1.01
志布志 伊王島 藍島	0.691	0.729	1.05

Fréq: 周波数応答解析
Hist: 非線形時刻歴応答解析

表-4.2.7 時刻歴応答解析結果

	応答加速度(有義値)			有義波	
	鉛直方向	直角方向	橋軸周り	波高(m)	周期(s)
宮古	0.044	0.547	0.941	1.60	4.88
浜金谷	0.051	0.602	0.919	1.70	5.03
下田	0.086	0.795	1.493	2.00	5.46
神戸	0.009	0.106	0.090	0.90	3.66
志布志	0.069	0.729	1.276	1.90	5.32
伊王島	0.069	0.729	1.276	1.90	5.32
藍島	0.069	0.729	1.276	1.90	5.32

注1) 応答値は解析3回の平均値

注2) 単位は、鉛直および水平方向: m/s^2 、橋軸周り: deg/s^2 注3) 許容値は、鉛直および水平方向: 0.6m/s^2 、橋軸周り: 2deg/s^2

注4) 志布志、伊王島および藍島の解析では同じ有義波を使用

		応答値(有義値)			
		1回目	2回目	3回目	平均
宮古	X2	0.560	0.556	0.689	0.602
	X3	0.096	0.097	0.099	0.097
	X4	1.119	1.113	1.317	1.183
	A2	0.561	0.548	0.533	0.547
	A3	0.043	0.044	0.044	0.044
	A4	1.029	0.947	0.848	0.941
浜金谷	X2	0.705	0.693	0.767	0.722
	X3	0.107	0.107	0.106	0.107
	X4	1.218	1.165	1.376	1.253
	A2	0.619	0.614	0.571	0.602
	A3	0.051	0.052	0.049	0.051
	A4	0.949	0.951	0.858	0.919
下田	X2	0.972	1.036	0.976	0.995
	X3	0.153	0.159	0.156	0.156
	X4	2.014	2.014	2.076	2.035
	A2	0.773	0.829	0.783	0.795
	A3	0.084	0.084	0.091	0.086
	A4	1.497	1.503	1.480	1.493
神戸	X2	0.069	0.062	0.100	0.077
	X3	0.056	0.056	0.056	0.056
	X4	0.091	0.072	0.165	0.109
	A2	0.110	0.107	0.102	0.106
	A3	0.009	0.009	0.009	0.009
	A4	0.089	0.082	0.097	0.090
志布志 (伊王島) (藍島)	X2	0.821	0.836	0.889	0.849
	X3	0.130	0.128	0.132	0.130
	X4	1.708	1.682	1.815	1.735
	A2	0.737	0.713	0.736	0.729
	A3	0.069	0.069	0.069	0.069
	A4	1.331	1.248	1.249	1.276

X2: 直角変位(m)、X3: 鉛直変位(m)、X6: 橋軸周り変位(deg)

A2: 直角加速度(m/s^2)、A3: 鉛直加速度(m/s^2)、橋軸周り加速度(deg/s^2)

(4) 中間フェンダーが無い場合についての検討

前項までは、水平方向の変形を抑制する目的で橋軸方向の中央部位置にフェンダー係留を設置した場合についての検討を行った。ここでは、宮古を例にこの中間フェンダーが無い場合についての時刻歴応答解析を行い、傾向の相違について検討する。

1) 固有値解析と振動特性

中間フェンダーが無い場合の固有値解析結果を図-4.2.44 に示す。刺激係数、有効質量比等は橋軸直角方向の値である。図中の固有モード図は、主要な（刺激係数が大きい）4 つの固有モード図を示している。

表-4.2.9 に中間フェンダーの有無による主要モードの固有周期を比較したものを示す。中間フェンダーが無いことで、ポンツーン、桁ともに対称形の低次モードにおいて固有周期が長くなっていることがわかる。

表-4.2.9 中間フェンダーの有無による主要モードの固有周期の比較

主要モード		中間フェンダー有り		中間フェンダー無し		比率 (無/有)
		次数	固有周期(s)	次数	固有周期(s)	
ポンツーン	水平対称1次	12	10.3490	11	15.1450	1.46
	水平逆対1次	11	11.4459	12	11.4458	1.00
	水平対称2次	17	8.8435	13	9.1376	1.03
	水平逆対2次	19	8.6404	19	8.6404	1.00
	水平対称3次	21	8.1951	21	8.1957	1.00
	水平逆対3次	23	7.7280	24	7.7280	1.00
桁	水平対称1次	30	6.7850	23	7.8425	1.16
	水平逆対1次	26	7.2201	27	7.2201	1.00
	水平対称2次	33	3.9834	33	5.2252	1.31
	水平逆対2次	35	3.4687	35	3.4687	1.00
	水平対称3次	36	2.3765	36	2.5185	1.06
	水平逆対3次	37	1.9652	37	1.9652	1.00

2) 時刻歴応答解析結果

宮古を対称に、中間フェンダーが無い場合の時刻歴応答解析を実施した結果(Sway、Heave、Roll の3方向の応答加速度および応答変位)を図-4.2.45~47 に示す。図-4.2.48 には、上部工(節点 11)とポンツーン(節点 508)、上部工橋梁中央位置(節点 11)と上部工フェンダー支間中央位置(節点 6)との、Sway 方向の応答加速度および応答変位を比較した結果を示す。また、図-4.2.49 に中間フェンダーの有無による Sway 方向の応答加速度および応答変位を、それぞれの場合で最大応答を与える節点(中間フェンダーが有る場合は節点 6、無い場合は節点 11)で比較した結果を示す。

図-4.2.49 を見ると、Sway 方向の応答加速度および応答変位は、中間フェンダーが有る場合より無い場合の方が小さい。また、中間フェンダーの有無による Sway、Heave、Roll の3方向の応答加速度および応答変位の有義値を比較したものを表-4.2.10 に示すが、Roll 方向に

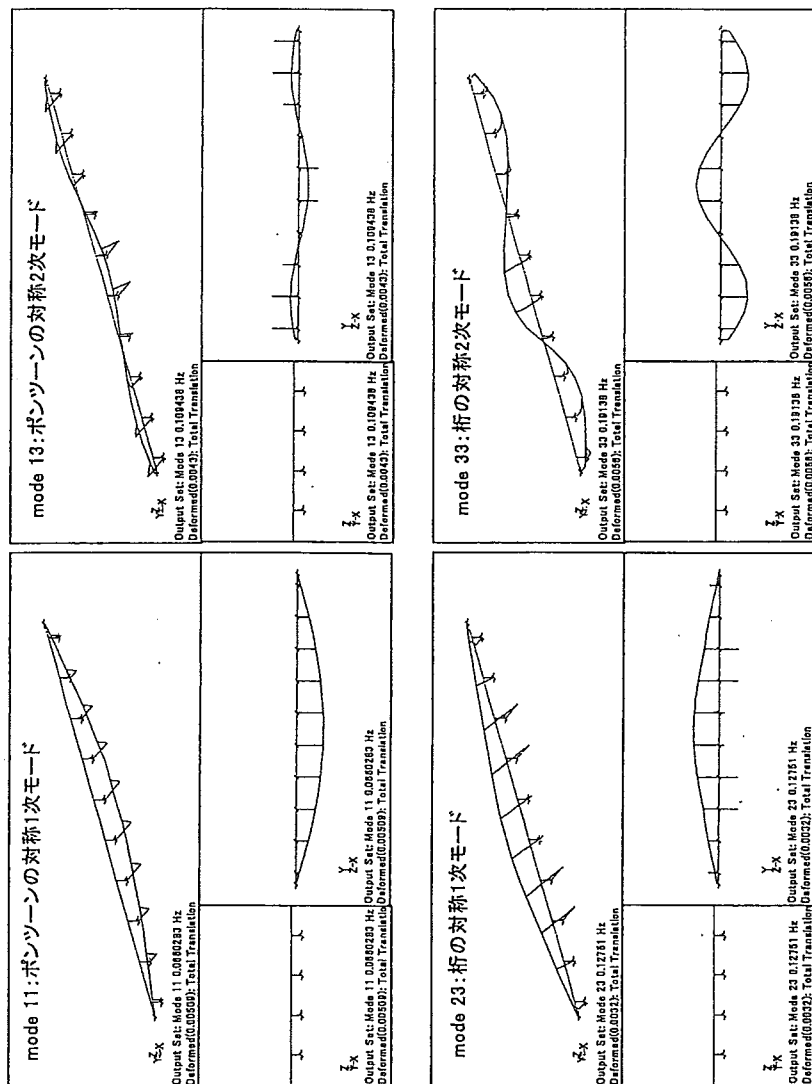
においても無い場合の方が 40%程度小さく、許容値に対して十分に余裕となる。これは、中間フェンダーが無い場合に上部工とポンツーンが異なる周期で振動して同調しなかったこと（図-4.2.48 参照）、ならびに外力である不規則波力の有義周期（ $T_{1/3}=4.88\text{s}$ ）に対して上部工は対称 1 次モードではなく、有効質量が中間フェンダー有りの場合と比較して半分程度となる対称 2 次モードで振動していることが原因と考えられる。

水平方向の変形を抑制する目的で設置した中間フェンダーは、逆に上部工の卓越モードである対称 1 次モードと不規則波力を同調させることとなり、水平方向の変形が増大する結果となっていることが確認された。

以上のことから、中間フェンダーを外すことで宮古以外の 6 地点においても応答が小さくなる可能性があり、フェンダーの設置等の構造系のより詳細な検討によっては、前項で浮体橋の適用性が得られなかった下田、志布志、伊王島、藍島の 4 地点も適用範囲内となる可能性があるものと考えられる。また、耐震設計における免震化の考え方と同様に、浮体橋の設計においても、外力である不規則波力の周期に対して浮体橋の卓越モードの固有周期を長周期化もしくは短周期化させて同調させないようにすることが極めて重要であることが確認された。

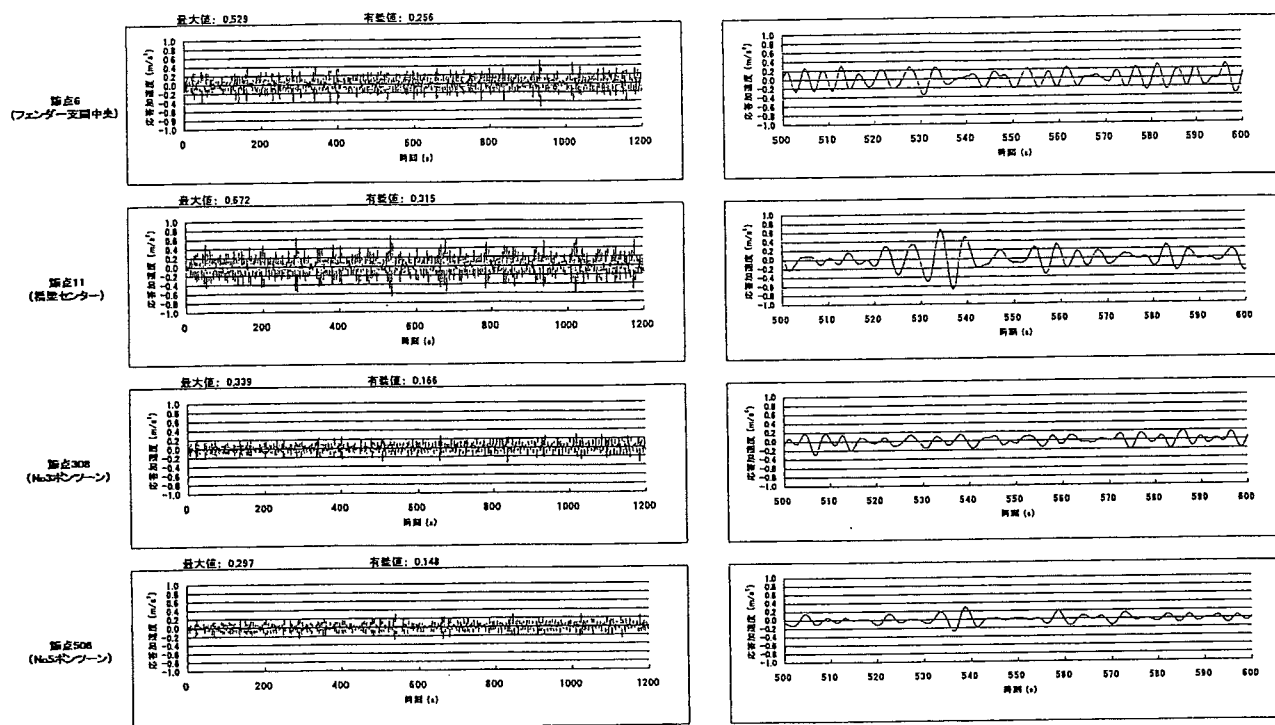
モード 次数	固有振動数 (Hz)	固有周期 (s)	刺激係数	刺激係数比	有効質量 (t, m^2)		実質有効 質量比	モード形状
1	0.0468	21.4548	0.0009	8.0000E-06	7.5457E-07	0.0000		mode 11: ボンツーンの対称1次モード
2	0.0481	20.8057	-0.0002	2.0000E-06	2.5712E-08	0.0000		
3	0.0481	20.7663	-0.0011	1.2000E-05	1.2393E-08	0.0000		
4	0.0481	20.7628	-0.0006	6.0000E-06	3.3280E-07	0.0000		
5	0.0481	20.7615	-0.0005	5.0000E-06	2.2720E-07	0.0000		
6	0.0481	20.7607	0.0002	2.0000E-06	2.2795E-08	0.0000		
7	0.0481	20.7607	-0.0001	1.0000E-06	3.1705E-08	0.0000		
8	0.0481	20.7605	-0.0001	1.0000E-06	8.8787E-08	0.0000		
9	0.0481	20.7604	-0.0006	6.0000E-06	3.4026E-07	0.0000		
10	0.0481	20.7600	0.0018	1.8000E-05	3.1282E-06	0.0000		
11	0.0860	15.1450	-262.4885	2.8018E+00	6.8906E+04	0.7919		mode 13: ボンツーンの対称2次モード
12	0.0874	11.4458	0.0005	8.0000E-06	2.9475E-07	0.7919		
13	0.1084	9.1376	-83.8906	1.0000E+00	8.7778E+03	0.8928		
14	0.1112	8.9921	0.0001	1.0000E-06	8.2977E-09	0.8928		
15	0.1113	8.9910	0.0049	5.2000E-05	2.4183E-05	0.8928		
16	0.1116	8.9910	-0.0086	1.0200E-04	9.2091E-05	0.8928		
17	0.1120	8.9772	0.0083	8.9000E-05	6.8602E-05	0.8928		
18	0.1133	8.8224	-0.0022	2.4000E-05	4.9300E-06	0.8928		
19	0.1157	8.6004	-0.0061	6.5000E-05	3.7481E-05	0.8928		
20	0.1167	8.5717	0.0012	1.3000E-05	1.5596E-08	0.8928		
21	0.1220	8.1957	27.7740	2.9644E-01	7.1190E+02	0.9017		mode 23: 桁の対称1次モード
22	0.1230	8.1314	0.0006	7.0000E-06	4.0800E-07	0.9017		
23	0.1275	7.8425	-4.9355	4.4823E-02	7.8365E-01	0.9019		mode 33: 桁の対称2次モード
24	0.1294	7.7280	0.0018	2.0000E-05	3.4645E-08	0.9019		
25	0.1329	7.5253	-0.0008	9.0000E-06	7.0768E-07	0.9019		
26	0.1363	7.3391	-2.9413	3.1394E-02	8.9535E+00	0.9020		
27	0.1385	7.2201	-0.0010	1.1000E-05	9.8602E-07	0.9020		
28	0.1419	7.0487	0.0007	8.0000E-06	5.1510E-07	0.9020		
29	0.1453	6.8812	-0.6605	7.0500E-03	4.3632E-01	0.9020		
30	0.1456	6.8705	-0.0002	2.0000E-06	3.2339E-08	0.9020		
31	0.1478	6.7668	-0.0008	7.0000E-06	3.9176E-07	0.9020		
32	0.1574	6.3517	0.0001	1.0000E-06	1.3085E-08	0.9020		
33	0.1593	6.2282	-63.2455	6.7505E-01	1.0000E+03	0.9479		
34	0.2543	3.9316	-0.0001	1.0000E-06	1.3046E-08	0.9479		
35	0.2583	3.6687	-0.0002	2.0000E-06	3.0930E-08	0.9479		
36	0.3971	2.5185	-58.4185	6.2353E-01	3.4127E+03	0.9872		
37	0.5089	1.9652	0.0001	1.0000E-06	5.8014E-08	0.9872		
38	0.6289	1.5952	0.0000	0.0000E+00	2.7108E-11	0.9872		
39	0.6337	1.5781	0.0000	0.0000E+00	2.5052E-11	0.9872		
40	0.6408	1.5610	31.4793	3.5599E-01	9.8094E+02	0.9985		
41	0.7129	1.4027	0.0000	0.0000E+00	2.4703E-14	0.9985		
42	0.8000	1.2501	0.0000	0.0000E+00	1.7939E-13	0.9985		
43	0.8092	1.2358	0.0000	0.0000E+00	1.0878E-11	0.9985		
44	0.8402	1.1902	0.0000	0.0000E+00	4.5818E-11	0.9985		
45	0.8957	1.1184	0.0000	0.0000E+00	6.5660E-12	0.9985		
46	0.9407	1.0631	0.0000	0.0000E+00	3.1028E-11	0.9985		
47	0.9557	1.0463	0.0000	0.0000E+00	2.0142E-12	0.9985		
48	0.9613	1.0402	0.0000	0.0000E+00	1.3945E-12	0.9985		
49	0.9931	1.0070	0.0000	0.0000E+00	1.5308E-10	0.9985		
50	0.9933	1.0068	0.0000	0.0000E+00	4.9297E-12	0.9985		

※ 刺激係数、有効質量等は、横軸直交方向の値を示す。

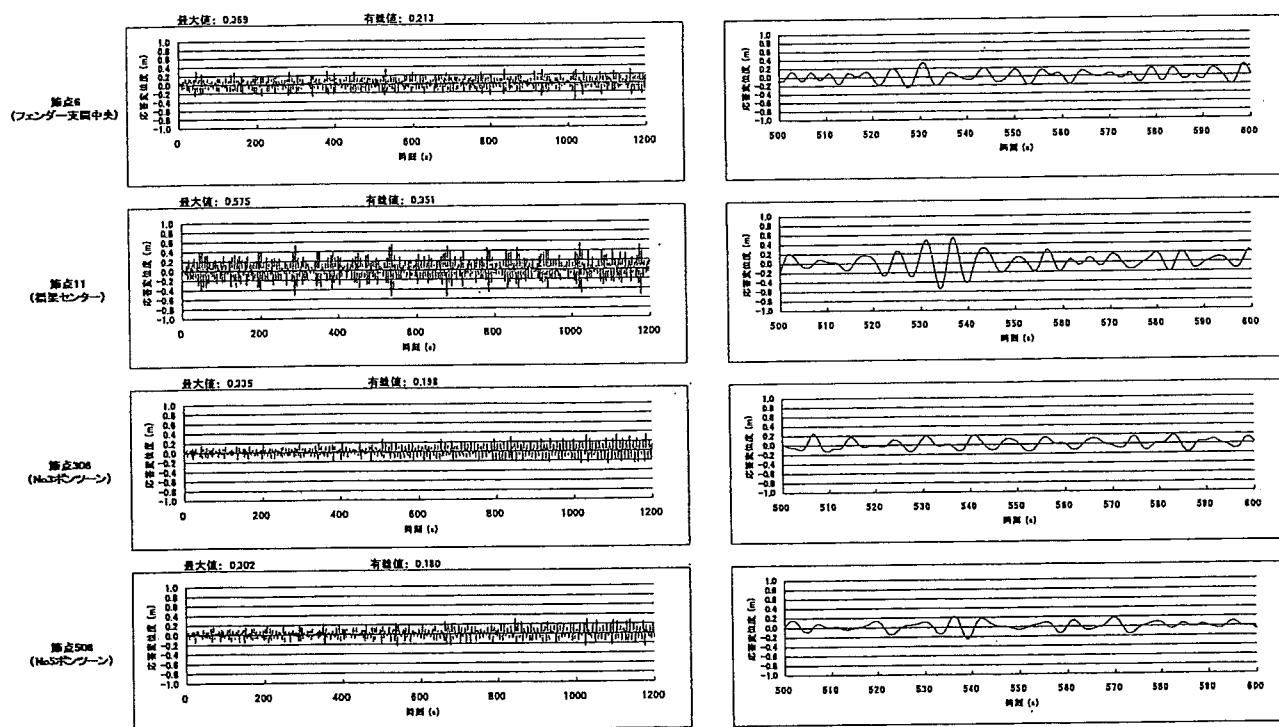


図ー4.2.44 中間フェンダーが無い場合のモード図

応答加速度



応答変位



不規則波力(入力外力)

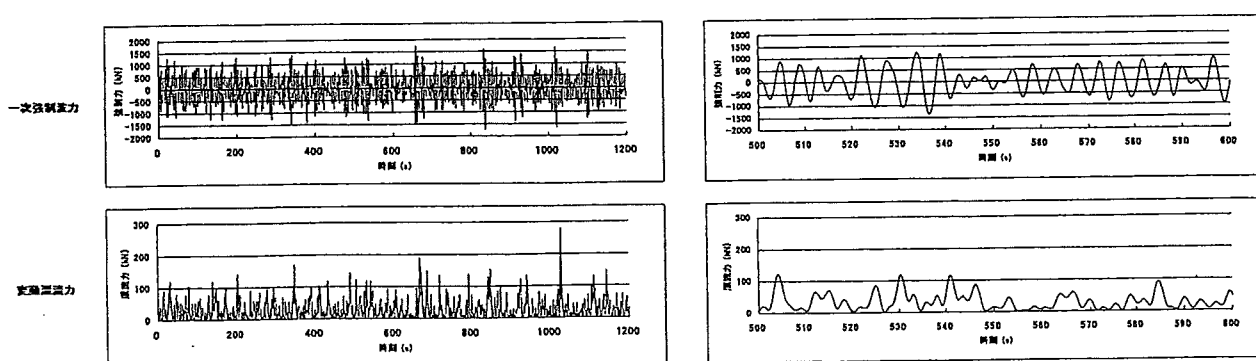
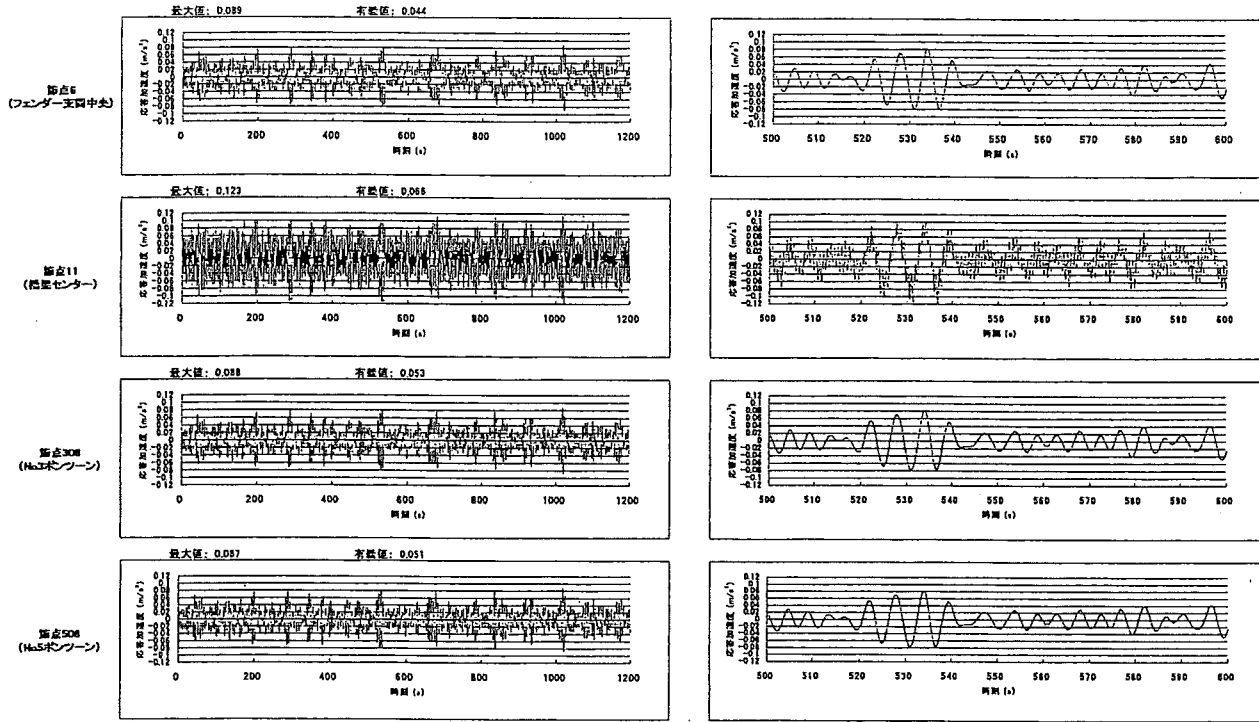
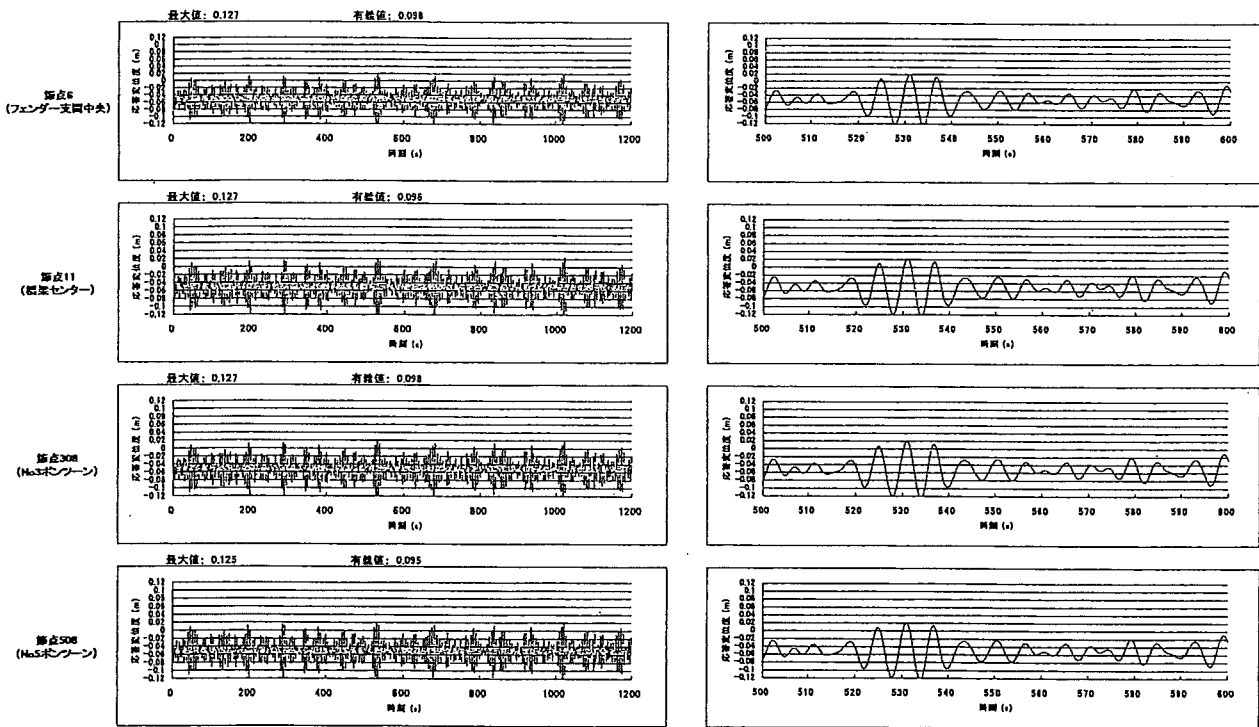


図-4.2.45 中間フェンダーが無い場合の時刻歴応答解析結果:宮古・直角方向 (Sway)

応答加速度



応答変位



不規則波力(入力外力)

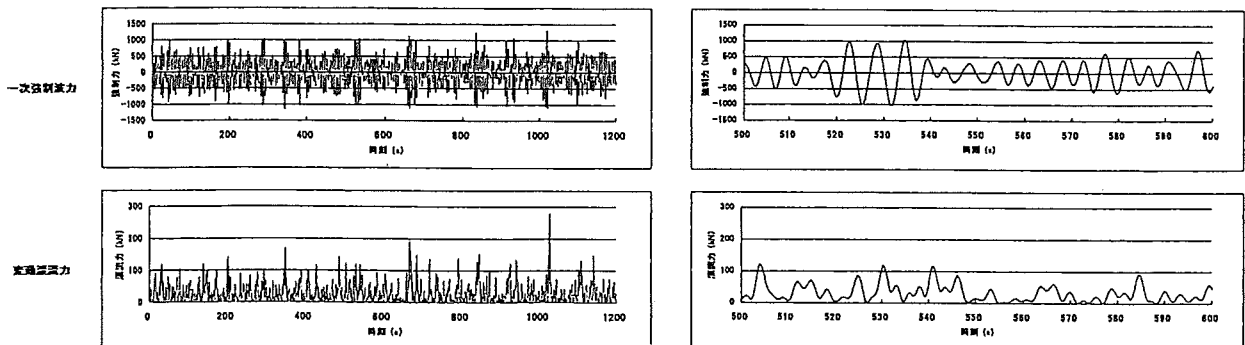
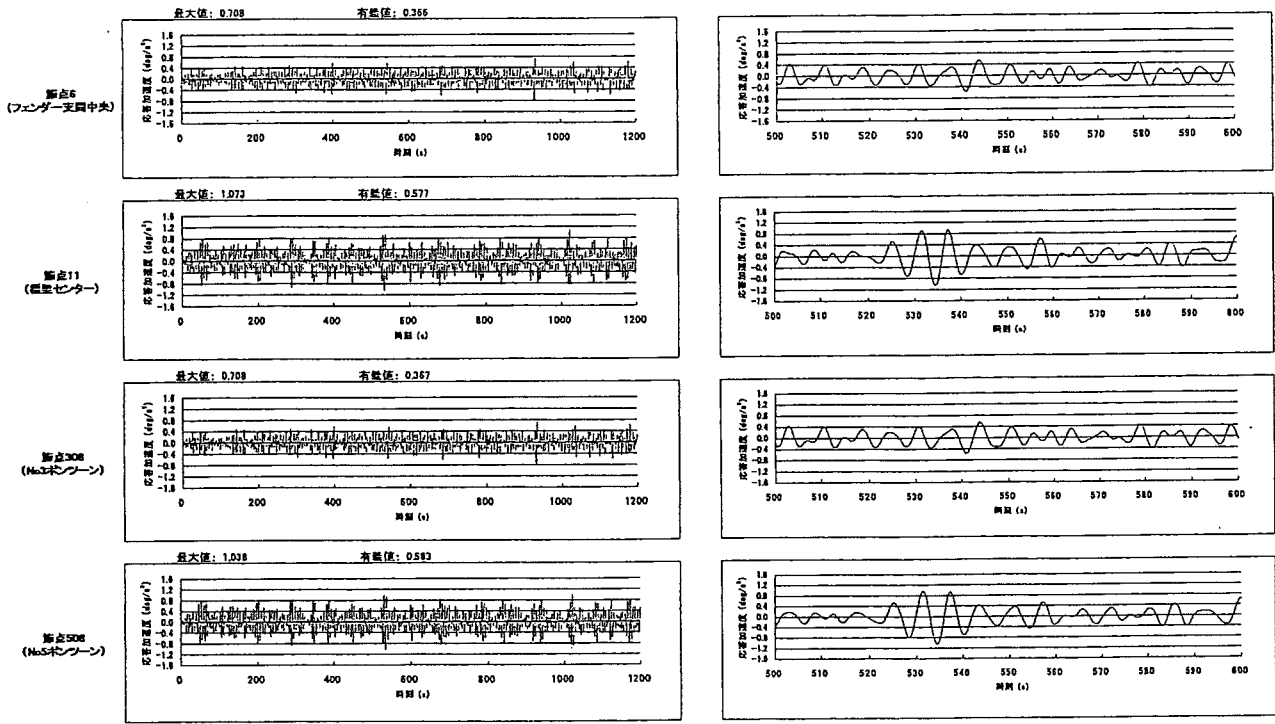
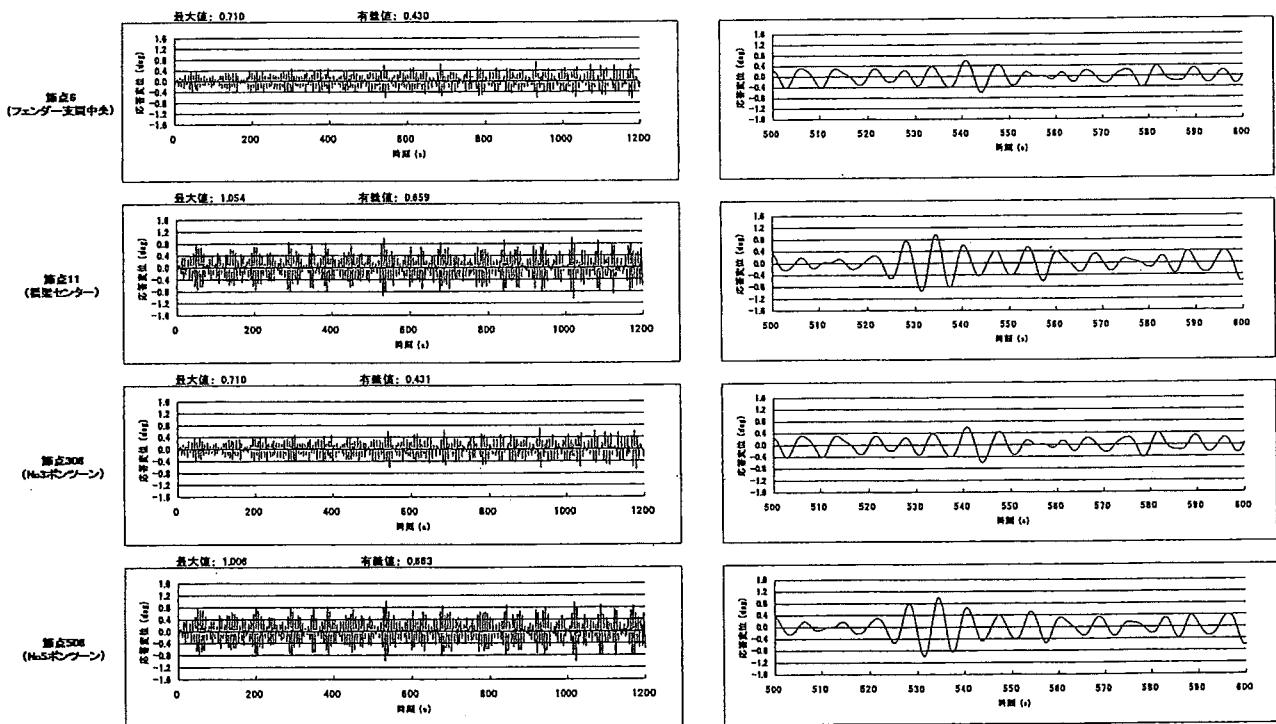


図-4.2.46 中間フェンダーが無い場合の時刻歴応答解析結果: 宮古・鉛直方向 (Heave)

応答加速度



応答変位



不規則波力(入力外力)

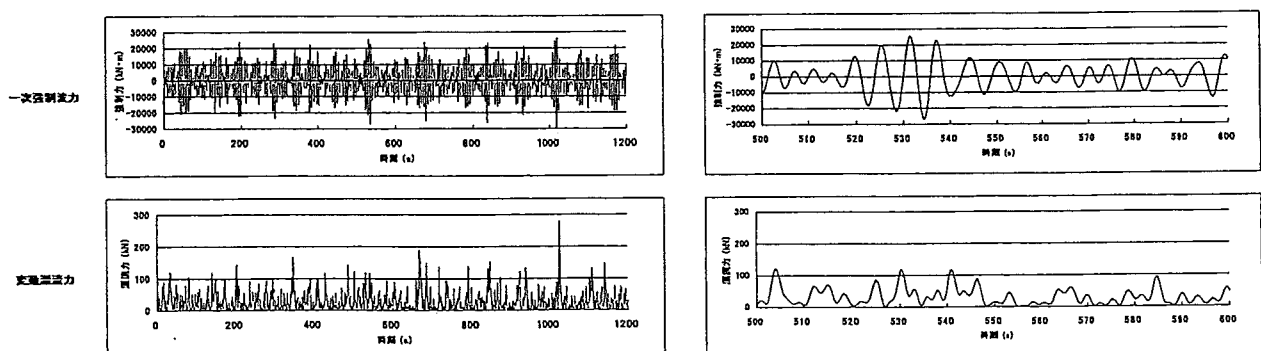


図-4.2.47 中間フェンダーが無い場合の時刻歴応答解析結果:宮古・橋軸回転 (Roll)

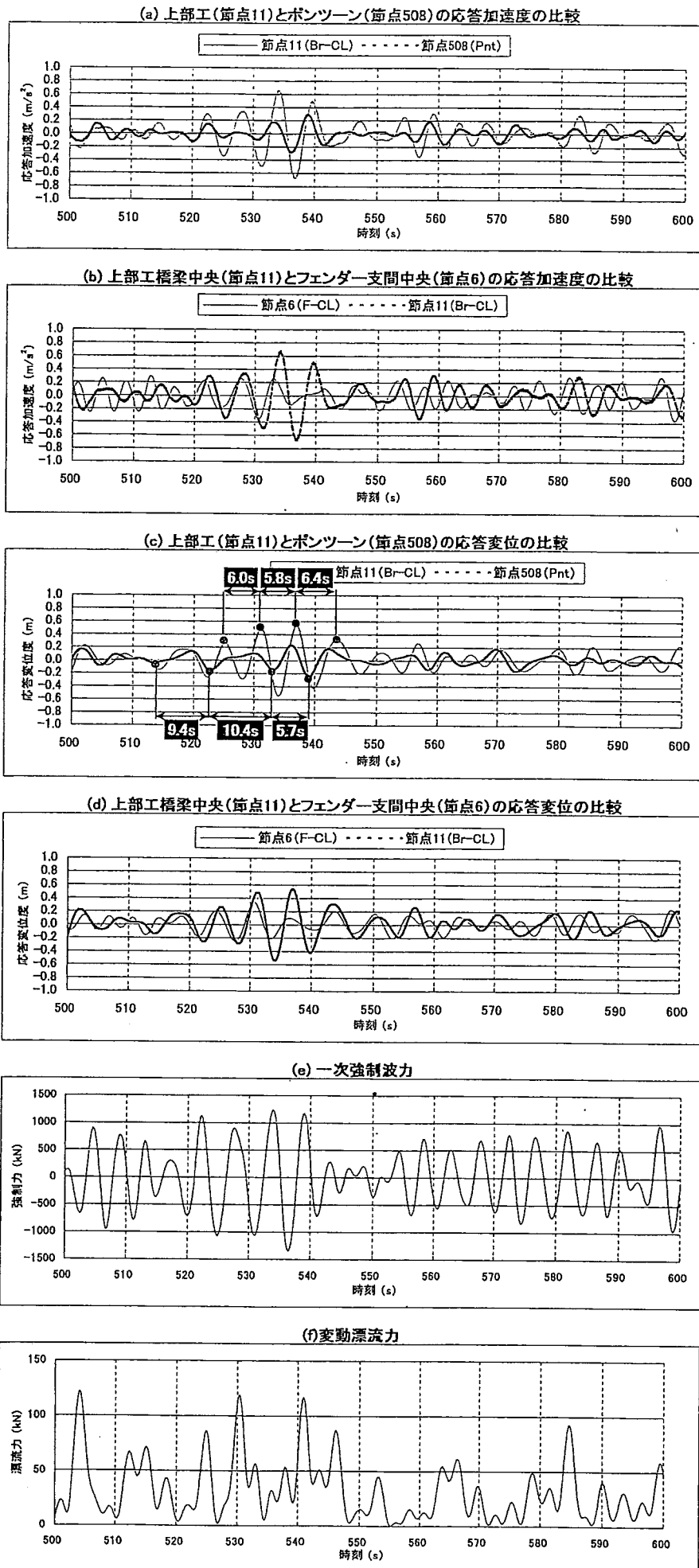
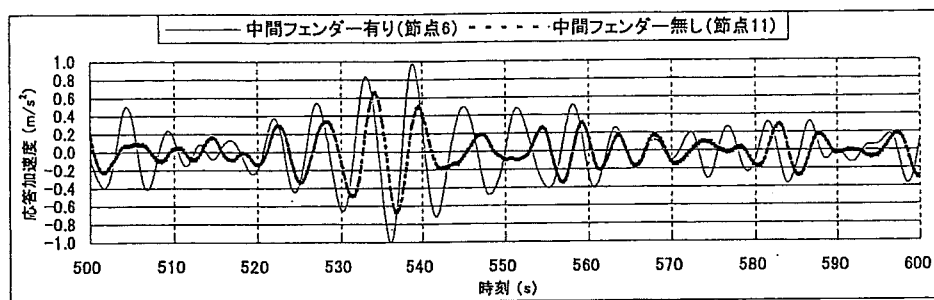


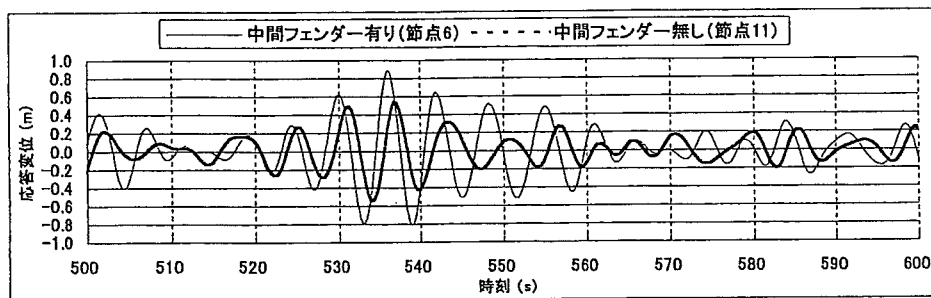
図-4.2.48 中間フェンダーが無い場合の応答加速度・応答変位の比較 (宮古・Sway)

表-4.2.10 中間フェンダーの有無による応答値の比較 (宮古)

	応答加速度 (有義値)		
	鉛直方向 (m/s^2)	直角方向 (m/s^2)	橋軸周り (deg/s^2)
中間フェンダー有り(節点6)	0.044	0.547	0.941
中間フェンダー無し(節点11)	0.066	0.315	0.577
比率(無/有)	1.50	0.58	0.61



(a) 応答加速度の比較



(b) 応答変位の比較

図-4.2.49 中間フェンダーの有無による応答値の比較 (宮古・Sway)

4.3 経済性に着目した検討

本項では、経済性の観点から、浮体橋と他の一般的な橋梁（以下、従来橋）との概算工費の比較により適用可能性を検討した。

4.3.1 検討方法

一般的に、従来橋では、架橋位置の水深が深いほど基礎構造が大規模となり工費が増大する。これに対して、浮体橋は、水の浮力を利用し基礎構造を不要とする橋梁形式であるため、水深が深いほど浮体橋の経済的メリットが大きくなることが予想される。そこで本検討では、複数の水深ケースに対し浮体橋と従来橋梁との概算工費を比較し、経済性の観点から、適用の可能性を検討した。

検討の対象とする橋梁は、表－4.3.1 に示すとおりである（浮体橋は「5.2 動揺量に着目した適用性検討」で用いたものと同じ）。また、水深ケースは、波浪観測地（40箇所）の水深が概ね20m以上であることから（表－2.2.2を参照）、表－4.3.2 に示す5ケースとした。

表－4.3.1 検討対象橋梁

	浮体橋	従来橋
上部工形式	9 径間連続鋼床版箱桁橋 (橋長 $l = 970\text{m}$)	9 径間連続鋼床版箱桁橋 (橋長 $l = 970\text{m}$)
下部工形式	鋼製ラーメン橋橋脚 ($h = 20\text{m}$)	鋼製ラーメン橋脚 ($h = 45、65、85\text{m}$)
基礎工形式	—	鋼管矢板井筒基礎
係留形式	カテナリー係留 ＋フェンダー係留	—

表－4.3.2 検討水深ケース

ケース	水深
ケース 1	20m
ケース 2	30m
ケース 3	40m
ケース 4	50m
ケース 5	60m

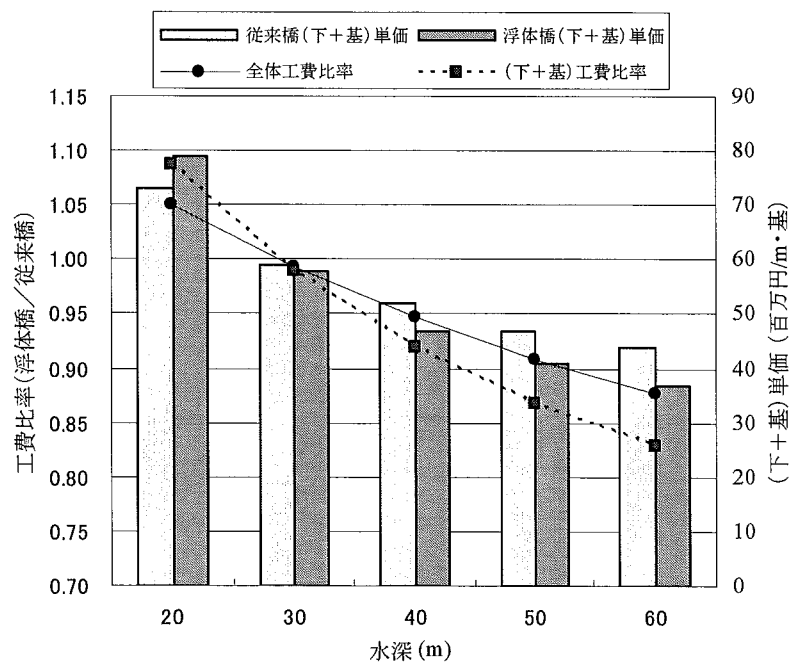
4.3.2 経済比較検討

従来橋と浮体橋の概算工費の比較を行った結果を、図－4.3.1 に示す。図中の全体工費比率は上部工を含めた全体工費、(下+基)工費比率は上部工と橋脚以外の全体工費の従来橋に対する浮体橋の工費比率を示している。また、(下+基)単価は上部工と橋脚以外の水深当たりの概略単価(下部工1基あたり)を示している。なお、浮体橋の中央部のフェンダー係留構造(基礎も含む)は工費に含まれている。

表－4.3.3 には、概算工費算出にあたっての概算数量を、表－4.3.4 には概算工費の内訳をそれぞれ示す。

図－4.3.1 から、水深が 20m では浮体橋に比べ従来橋の方が若干経済的となっているが、30m 以上では、浮体橋の方が経済的となることが確認できた。従来橋と浮体橋とのコスト差の要因である下部工と基礎工のみの工費では、水深が深くなるほど、従来橋と比べた浮体橋の工事費が下がっていることが確認できる。さらに、水深当たりの単価の差が、水深が深くなるほど大きくなる傾向にある。この傾向は、水深が深くなるほど、従来橋と浮体橋との工事費の差が大きくなることを意味している。これらのことから、水深が深いほど浮体橋の経済的メリットが大きくなるものと考えられる。

参考のため、連続ポンツーン型浮体橋での従来橋との経済性比較を行った事例を示す。茨城県霞ヶ浦で、連続ポンツーン型浮体橋の構想(橋長 10@100=1000m、水深 30m)があり、各種検討が実施されている。その中で、従来橋に比べ浮体橋は、約 25%の工費縮減が可能との報告⁴⁾がある。



図－4.3.1 工費の比較

表-4.3.3 概算数量

項目			単位	水深 H= 20m	水深 H= 30m	水深 H= 40m	水深 H= 50m	水深 H= 60m
上部工	橋面積	橋長	m	970	970	970	970	970
		幅員	〃	27.35	27.35	27.35	27.35	27.35
		橋面積	m ²	26,430	26,430	26,430	26,430	26,430
下部工	柱 (Me 橋脚)	一般脚柱高	m	45.0	55.0	65.0	75.0	85.0
		浮体脚柱高	m	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
		単位鋼重	t/m	30	30	30	30	30
		基数	基	10	10	10	10	10
		一般脚鋼重	tf	13,500	16,500	19,500	22,500	25,500
		浮体脚鋼重	tf	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
	フーチング (Re)	フーチング径	m	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5
		フーチング高	〃	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
		基数	基	10	10	10	10	10
		フーチング体積	m ³	2,835	2,835	2,835	2,835	2,835
	基礎 (鋼管矢板)	単位杭長	m/本	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
		杭本数	本	30	30	30	30	30
		基数	基	10	10	10	10	10
		杭長	m	9,000	9,000	9,000	9,000	9,000
	ホーンツーン (Re)	コンクリート体積/	m ³ /基	2,500	2,500	2,500	2,500	2,500
		基数	基	10	10	10	10	10
		コンクリート体積	m ³	25,000	25,000	25,000	25,000	25,000
	アンカーチェーン	チェーン長	〃	100	150	200	250	300
		本数/函	本	10	10	10	10	10
		ホーンツーン数	函	10	10	10	10	10
		単位重量	t/m	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
		チェーン重量	tf	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000
	アンカー基礎	基礎縦	m	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
		〃 横	〃	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
		〃 高	〃	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
		本数/函	本	10	10	10	10	10
		ホーンツーン数	函	10	10	10	10	10
		コンクリート体積	m ³	24,500	24,500	24,500	24,500	24,500
	フェンダー柱 (Re)	柱縦	m	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
		〃 横	〃	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
		〃 高	〃	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0
		コンクリート体積	m ³	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
	フェンダー基礎 (鋼管矢板)	単位杭長	m/本	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
		杭本数	本	10	10	10	10	10
		基数	基	6	6	6	6	6
		杭長	m	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800

※  は水深によって工費が変化する項目を示す。

表-4.3.4 概算工費

項目	単価	単位	水深 H=20m			水深 H=30m			水深 H=40m		
			従来橋梁		浮体橋梁	従来橋梁		浮体橋梁	従来橋梁		浮体橋梁
			数量	金額	数量	金額	数量	金額	数量	金額	数量
上組工											
		400	26,430	10,612,000	26,430	10,612,000	26,430	10,612,000	26,430	10,612,000	26,430
		1,000	13,500	13,500,000	6,000	6,000,000	15,500	16,500,000	19,500	19,500,000	6,000
下組工	Me 橋脚柱	m ³	2,835	227,000	—	0	2,835	227,000	—	0	—
	フーチング(Rc)	m ³	9,000	900,000	—	0	9,000	900,000	—	0	—
	基礎(鋼管矢板)	m	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	ボーンレン(Rc)	200	—	0	25,000	5,000,000	—	0	25,000	5,000,000	—
	フーチング	1,500	—	0	2,000	3,000,000	—	0	—	—	—
	フーチング基礎(Rc)	65	—	0	24,500	1,593,000	—	0	24,500	1,593,000	—
	フーチング柱(Rc)	80	—	0	1,500	120,000	—	0	—	—	—
フーチング基礎(鋼管矢板)			—	0	1,800	180,000	—	0	1,800	180,000	—
合計			25,239,000 (1.00)			26,505,000 (1.05)			28,239,000 (1.00)		
						28,045,000 (0.99)			31,239,000 (1.00)		
									29,585,000 (0.95)		

項目	単価	単位	水深 H=50m			水深 H=60m		
			従来橋梁		浮体橋梁	従来橋梁		浮体橋梁
			数量	金額	数量	金額	数量	金額
上組工								
		400	26,430	10,612,000	26,430	10,612,000	26,430	10,612,000
		1,000	22,500	22,500,000	6,000	6,000,000	25,500	25,500,000
下組工	フーチング(Rc)	m ³	2,835	227,000	—	0	2,835	227,000
	基礎(鋼管矢板)	m	9,000	900,000	—	0	9,000	900,000
	ボーンレン(Rc)	200	—	0	25,000	5,000,000	—	0
	フーチング	1,500	—	0	5,000	7,500,000	—	0
	フーチング基礎(Rc)	65	—	0	24,500	1,593,000	—	0
	フーチング柱(Rc)	80	—	0	1,000	240,000	—	0
	フーチング基礎(鋼管矢板)	100	—	0	1,800	180,000	—	0
合計			34,239,000 (1.00)			31,125,000 (0.91)		
						37,239,000 (1.00)		
						32,665,000 (0.88)		

※ は水深によって工費が変化する項目を示す。

4.4 まとめ

浮体橋は、水の浮力を利用するため基礎構造を省略できる点に特徴がある。そのため、コスト削減が期待される反面、波浪時における動揺に対して必要な性能を確保することが必要となる。本章では、我が国沿岸部における浮体橋の適用性を評価するために、車両の走行安定性の観点から波浪による動揺量に関する検討、コスト削減の観点から従来橋との経済性の比較検討を実施した。検討結果を、以下に整理して示す。

(1) 動揺量に着目した検討

分離ポンツーン型浮体橋を対象として、我が国沿岸部の波浪条件下での動揺に対する適用性を評価するために、周波数応答解析および非線形時刻歴解析による動揺解析を行い、車両の走行安定性の指標となる上部工位置での応答加速度を算出し、許容値との比較を行った。その結果、全国の波浪観測地点（40 地点）のうち、3 地点で応答加速度の許容値を満足した。また、フェンダー係留の設置等の構造系のより詳細な検討によっては、その他の 4 地点においても許容値を満足する可能性があることが確認された。なお、これらの 7 地点は、主に太平洋沿岸部や瀬戸内海の比較的静穏な沿岸部であった。

浮体橋の設計において、耐震設計における免震化の考え方と同様に、浮体橋の卓越モードを長周期化もしくは短周期化させて、外力である波力の周期と同調しないような構造系にすることが重要であることが確認された。

(2) 経済性に着目した検討

橋長約 1000m で同一の上部構造を有する、分離ポンツーン型浮体橋と従来橋について、水深をパラメータとして概算工費の比較を行った。その結果、水深 30m 程度以上になると、浮体橋が従来橋に比べコスト的に有利となることがわかった。なお、対象とした分離ポンツーン型については連続ポンツーン型と比較して、一般に工費は高くなる。従って、波浪条件等による適用上の制約はあるものの、連続ポンツーン型の適用が可能な場合には、水深の浅い地点においても浮体橋が従来橋と比較してコスト的に有利となる可能性がある。

【参考文献（4 章）】

- 1)例えば、本州四国連絡橋公団：本州四国連絡橋公団年報・要覧 2004
- 2)建設省土木研究所：強風対策工の防風効果と橋梁の耐風安定性に関する調査報告書、土木研究所資料第 3720 号、2000.3
- 3)社団法人 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、1999
- 4)いばらき建設技術研究会：霞ヶ浦に架ける浮体橋、2001.7

5 今後の課題

本研究では、浮体橋の設計で特に重要となる、波浪に対する動揺量推定手法の開発と、これを用いた我が国沿岸部における適用性の検討を行ったものである。

以下に、浮体橋特有の外的作用である波浪による動揺に対する設計に関して、今後検討すべき課題を整理する。

(1) 動揺解析

本研究では、チェーン（カテナリー係留）とフェンダー（フェンダー係留）により係留された独立ポンツーンの浮体橋を対象に、動揺量推定手法の開発を行った。解析に用いる外力として、波浪と風を、それぞれ流体力と風荷重として同時に扱うことを可能にした。一方、我が国は、浮体橋が適用されている地域に比べ厳しい気象条件であり、係留形式や浮体形式の選択の幅を広げておくことが実用化に向けて重要である。また、波浪の位相差や風の方向といった、より現実に近い荷重条件を考慮した解析を可能にする必要がある。

以上を踏まえ、動揺解析における今後の課題として以下のものが挙げられる。

- ① TLP 係留やドルフィン係留などの他の係留形式への拡張
- ② 連続ポンツーンなどの他の浮体構造への拡張
- ③ 波浪の位相差や入射角に対する自由度
- ④ 風の入射角に対する自由度

(2) 暴風時波浪に対する構造安全性

本研究では、我が国沿岸部における浮体橋の適用性について、車両の走行安定性の観点から検討した。波浪の影響を受ける海洋部に浮体橋を適用する場合、暴風時波浪に対する構造安全性が問題となる。また、外海に面している箇所では津波の襲来が考えられ、ポンツーンの沈没や漂流といった致命的な損傷を受ける可能性が考えられる。今後は、比較的厳しい海洋、気象条件の箇所に架橋される場合を想定し、波浪による大きな外力に対する挙動を把握し、浮体橋の終局限界状態をより明確にするとともに、安全性の観点から適用性の評価を行う必要がある。

浮体橋の終局限界状態を考える上で、考慮すべき事項を以下に列挙する。

- ① 漂流に対する安全性（係留系の構造安全性）
- ② 沈没に対する安全性（ポンツーンを構成する部材の構造安全性）
- ③ 津波時のポンツーンの安定性
- ④ 地震の影響

また、本研究では、供用時の走行安定性に対する照査のための工学的指標として、上部構造位置における応答加速度（水平、鉛直、回転方向）を用い、その許容値としてノルウェーの設計基準を準用した。応答加速度の許容値については、現段階では明確な規定が無いことから、その妥当性について今後確認しておく必要がある。

なお、浮体橋の設計に関しては、土木学会において「浮体橋の設計指針（案）」（平成 14 年 6 月）が刊行されており、性能照査型設計法に基づく設計の基本的事項が整理されている。

（３） 合理的な設計に向けた構造検討

本研究では、カテナリー係留された分離ポンツーン型浮体橋を対象を絞って、波浪条件や水深に着目した各種検討を行い、その構造特性や適用性を把握した。今後、より合理的な浮体橋の設計の実現に向けて、種々の構造形式を対象とした動揺に対する感度分析などを実施し、各構造特性の把握と波浪条件に対する適用性を評価するとともに、動揺量を抑制することが可能な新たな構造形式の提案などを行っていく必要がある。

（４） 接合部構造の検討

浮体橋は水に浮かぶ構造であり、潮流や波浪などにより大変位、大変形が生じやすい。また、潮位の変動による鉛直変位にも配慮しなければならない。そのため、今後、これらの変位・変形に追従できる接合部構造について検討していく必要がある。なお、検討に際しては、接続部構造の変形性能とコスト面の両面からの検討が重要である。

(巻末資料)

資料 1 : 浮体橋の適用事例

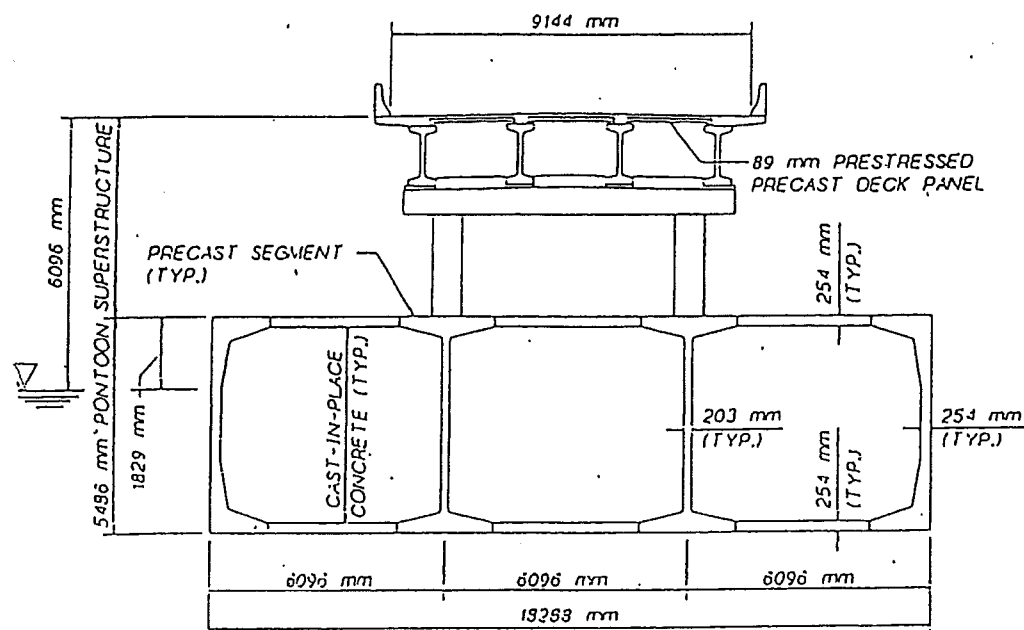
資料 2 : 適用性の検討に用いた波浪観測地点の有義波

資料 3 : 観測波高による極値統計解析

【巻末資料 1】 浮体橋の適用事例

Hood Canal 橋（西側再建部）

断面図



概要

Hood Canal浮橋の西部橋梁は1979年2月に台風で崩壊され、1982年10月に再建された。

次の条件を確保することに設計基準を設定された。

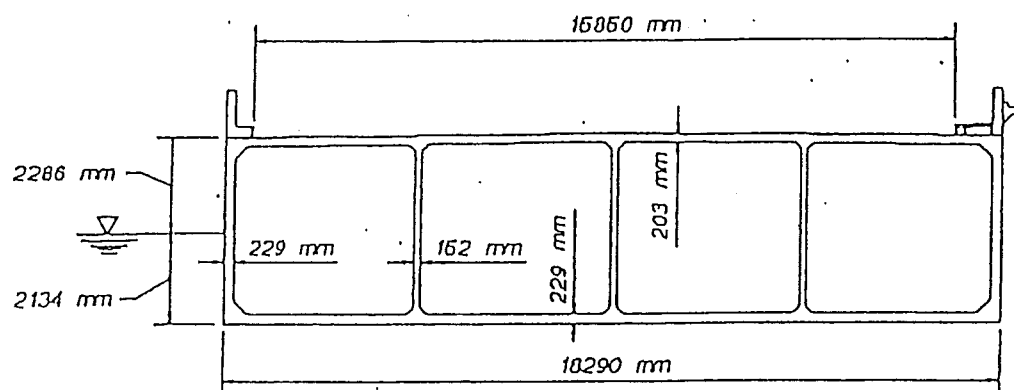
1. 通常の台風では崩れない。
2. 通常の台風で快適な運転ができる。
3. 極めて強い台風では致命的な破壊が生じない。
4. 全構造の崩壊に対する安全性を有する。
5. 最小限度の維持管理が必要とされる。

構造解析に当たっては、浮橋は弾性基礎にあるはり要素と考える。鉛直荷重は浮力に、水平荷重はアンカーケーブルに抵抗させている。また、ねじれ荷重に対し浮力とケーブル力の組み合わせは作用している。

静的荷重に対する構造物の応答を把握するには、一般に使われている静的剛性手法（static stiffness approach）を採用された。動的解析は、船舶の海水荷重による応答の推定に採用されるstrip theoryに基づいた解析である。

Evergreen Point 橋 (第2ワシントン湖橋)

断面図



概 要

1963年8月8日完成.

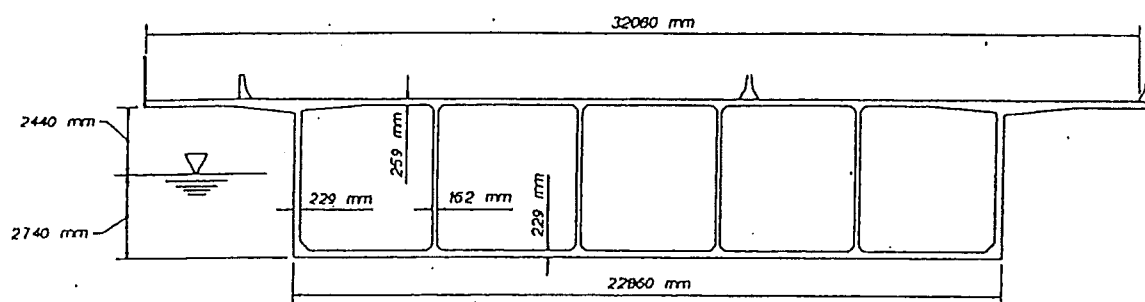
33基のPCポンツーンで構成され、連続ラーメン構造.

橋長2310m. 4車線. 大型船に対しクリアランスが61m.

ポンツーンは長さ110m、幅18.3m、高さ4.5m.

Homer M. Hadley 橋 (第3ワシントン湖橋)

断面図

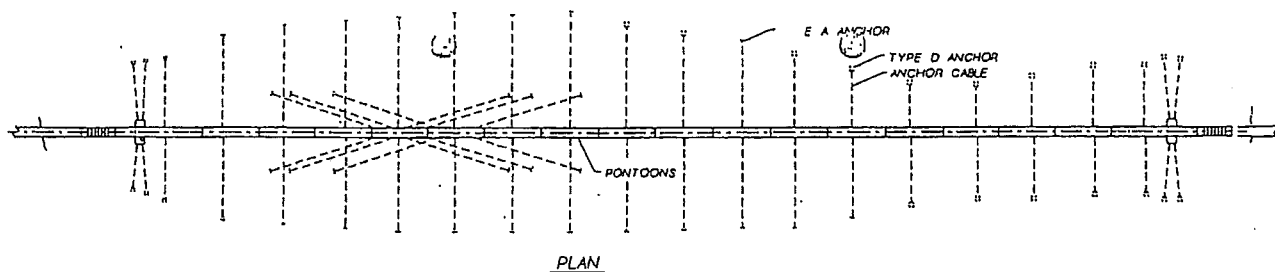


概 要

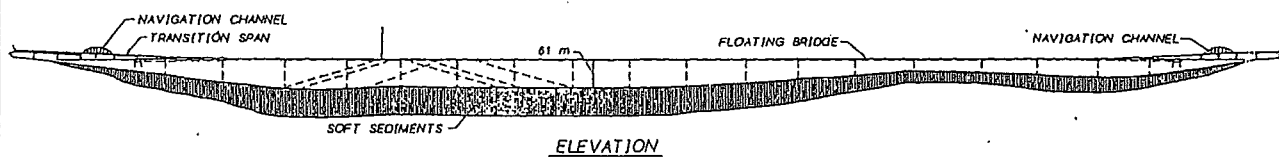
1989年6月4日完成。
18基のPCポンツーンで構成され、連続ラーメン構造。
橋長1771m。5車線。クリアランスは設けていない。
現在、交通量は100,000台/日以上。
ポンツーンは長さ 108m、幅 22.9m、高さ 4.9m。

新 Lacey V. Murrow 橋 (第 1 ワシントン湖橋)

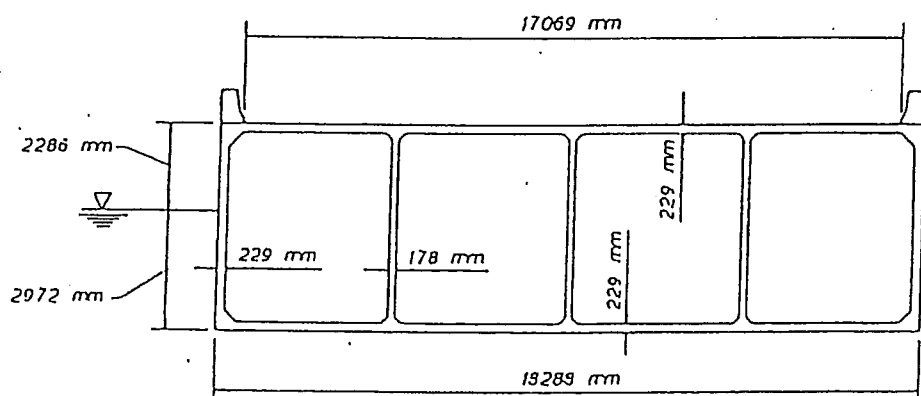
平面図



側面図

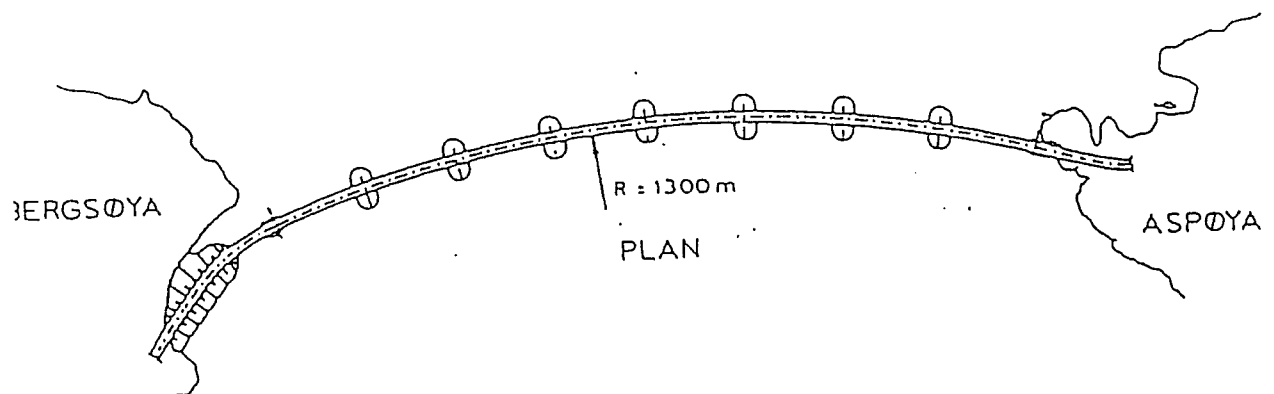


断面図

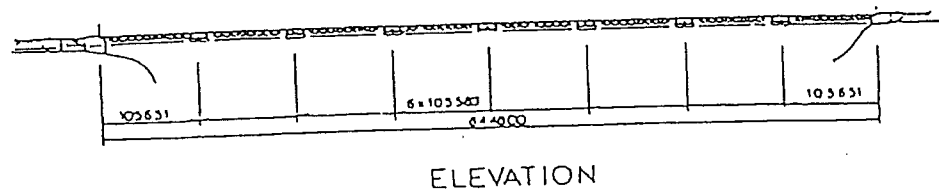


Bergsoysund 橋

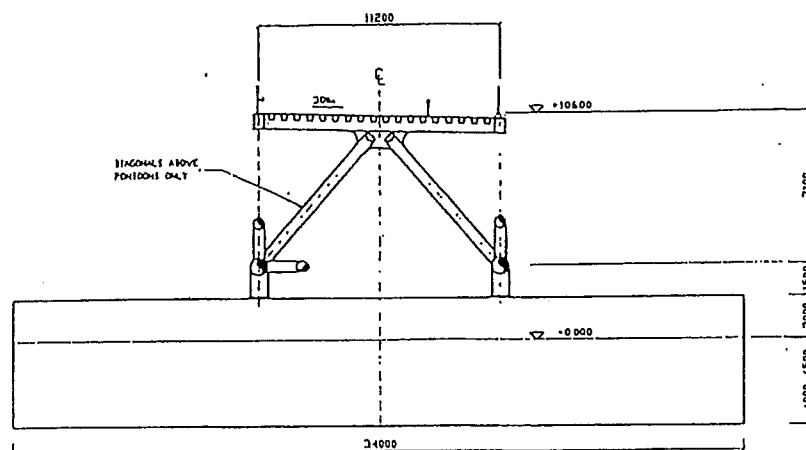
平面図



側面図

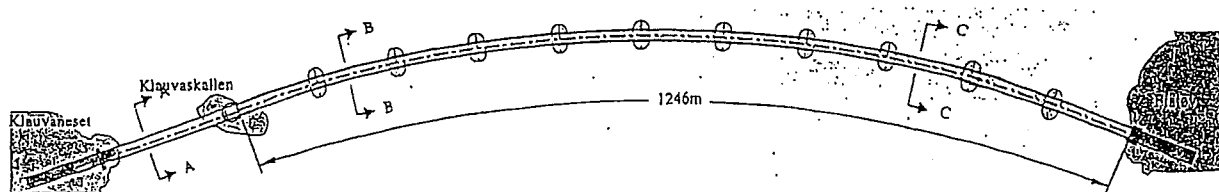


断面図

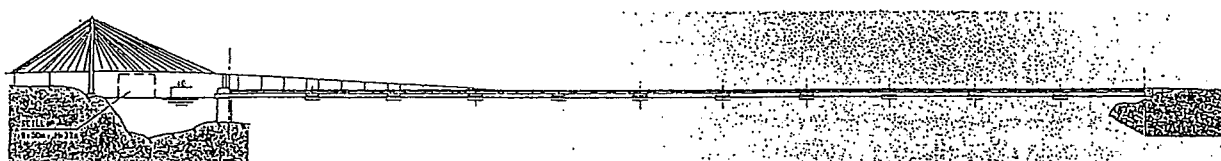


NordHordland 橋 (Salhus 橋)

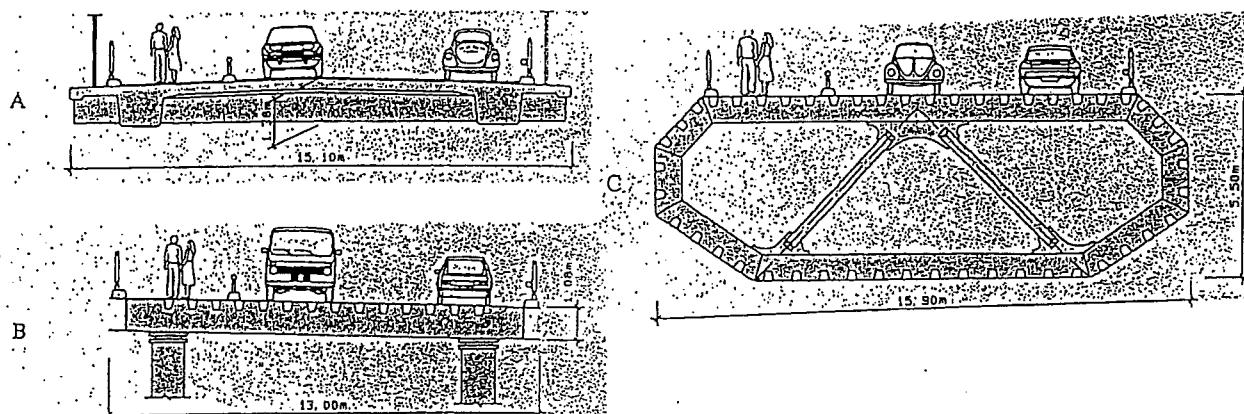
平面図



側面図



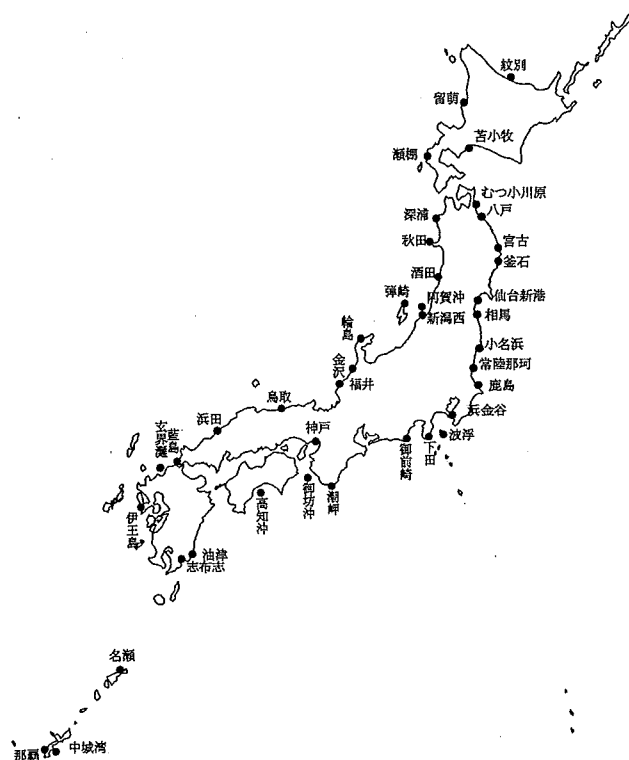
断面図



【巻末資料2】適用性の検討に用いた波浪観測地点の有義波

全国の波浪観測地点（40地点）のうち、非超過確率98%の波高が3m以下となる観測地点を対象に検討用有義波を算出した。なお、「4章 浮体橋の適用性の検討」で用いた有義波は、下表中の網掛で表した7地点のものである。

観測箇所	有義波		表番号
	波高	固有周期	
紋別	2.70	6.34	1
苫小牧	2.18	5.69	2
八戸	2.63	6.25	3
宮古	1.60	4.88	4
釜石	2.38	5.95	5
仙台新港	2.08	5.56	6
相馬	2.38	5.95	7
小名浜	2.65	6.28	8
常陸那珂	2.78	6.43	9
浜金谷	1.70	5.03	10
下田	2.00	5.46	11
御前崎	2.03	5.49	12
潮岬	2.93	6.60	13
御坊沖	2.68	6.31	14
神戸	0.90	3.66	15
高知沖	2.63	6.25	16
油津	2.85	6.52	17
志布志	1.90	5.32	18
伊王島	1.90	5.32	19
藍島	1.90	5.32	20
玄界灘	2.73	6.37	21
中城湾	2.85	6.52	22



* 検討用有義波は、港湾技研資料744号から統計的に算出。

（統計処理に用いたデータは、台風・暴風時を含む観測期間中の全データである）

** 有義波の波高 $H_{1/3}$ は、再現確率98%となる最大波高。

*** 有義波の周期 $T_{1/3}$ は、 $T_{1/3}=3.86 \cdot (H_{1/3})^{1/2}$ より算出

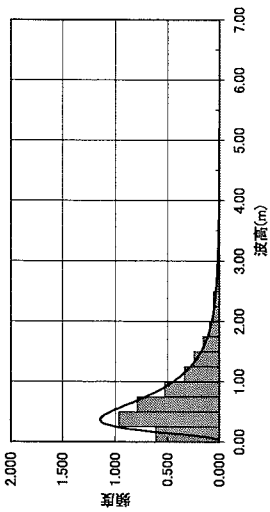
表-1 表別 波高・周期別度数分布

周期階級 波出階級	(階級別出現度数)																		出現率 (%)	累積率 (%)		
	0.0~ 3.0	3.0~ 4.0	4.0~ 5.0	5.0~ 6.0	6.0~ 7.0	7.0~ 8.0	8.0~ 9.0	9.0~ 10.0	10.0~ 11.0	11.0~ 12.0	12.0~ 13.0	13.0~ 14.0	14.0~ 15.0	15.0~ 16.0	16.0~ 17.0	17.0~ 18.0	18.0~ 19.0					
12.00~																		0	0.0	20813	100.0	
																		0	0.0	20813	100.0	
10.00~11.00																		0	0.0	20813	100.0	
9.00~10.00																		0	0.0	20813	100.0	
8.00~9.00																		0	0.0	20813	100.0	
7.00~8.00											1	1						2	0.0	20813	100.0	
6.50~7.00									1	1	2							4	0.0	20811	100.0	
6.00~6.50																		0	0.0	20807	100.0	
5.50~6.00								2		3								5	0.0	20807	100.0	
5.00~5.50								2	3	2	3							10	0.0	20802	99.9	
4.50~5.00								1	2	4	1	1						10	0.0	20792	99.9	
4.00~4.50					4			18	12	12	5	2	1					54	0.3	20782	99.9	
3.50~4.00				26	26	26		26	26	18	15	7	2					97	0.5	20728	99.6	
3.00~3.50					8	42	39	37	28	19	1							174	0.8	20631	99.1	
2.50~3.00				2	21	76	77	66	30	21	7							300	1.4	20457	98.3	
2.00~2.50				28	138	172	115	78	63	20	7							621	3.0	20157	96.8	
1.75~2.00				6	60	123	123	86	66	31	9	2						611	2.5	19536	93.9	
1.50~1.75				20	173	179	176	131	103	44	11	3						840	4.0	19025	91.4	
1.25~1.50				110	376	261	201	157	113	56	5							1281	6.2	18185	87.4	
1.00~1.25				12	345	459	357	269	152	103	61	8		1				1767	8.5	16904	81.2	
0.75~1.00				172	702	717	482	369	203	89	39	13	4	3				2773	13.3	15137	72.7	
0.50~0.75				6	457	1218	1044	623	402	215	90	43	8	4	3	6	1	2	4122	19.8	12364	59.4
0.25~0.50				61	827	1776	1231	626	322	106	52	9	4	1	3	4	1	5023	24.1	8242	39.6	
0.00~0.25				442	728	1014	695	285	66	36	13	2	6	1	1			3219	15.5	3219	15.5	
出現度数	509	2196	5191	4715	3089	2248	1365	844	441	146	41	14	10	1	3	0	0	20813				
出現率 (%)	2.4	10.6	24.9	22.7	14.8	10.8	6.6	4.1	2.1	0.7	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20813				
累積率 (%)	509	2705	7896	12611	15700	17448	19313	20157	20598	20744	20785	20799	20809	20810	20813	20813	20813	20813				
累積率 (%)	2.4	13.0	37.9	60.6	75.4	86.2	92.8	96.8	99.0	99.7	99.9	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0				

出典：港湾技術資料No.744

周期代表値 1.5 3.5 4.5 5.5 6.5 7.5 8.5 9.5 10.5 11.5 12.5 13.5 14.5 15.5 16.5 17.5 18.5 19
代表値×頻度 763.5 7686 23359.5 25932.5 20076.5 16860 11602.5 8018 4630.5 1679 512.5 189 145 15.5 49.5 0 0 0

波高の頻度分布



周期階級 波高階級	(階級別出現度%)										出現度 (%)	出現度數	累積率 (%)					
	0.0~ 3.0	3.0~ 4.0	4.0~ 5.0	5.0~ 6.0	6.0~ 7.0	7.0~ 8.0	8.0~ 9.0	9.0~ 10.0	10.0~ 11.0	11.0~ 12.0								
12.00~												0	0.0	33897	100.0			
11.00~12.00													0	0.0	33897	100.0		
10.00~11.00													0	0.0	33897	100.0		
9.00~10.00													0	0.0	33897	100.0		
8.00~9.00													0	0.0	33897	100.0		
7.00~8.00													0	0.0	33897	100.0		
6.50~7.00													0	0.0	33897	100.0		
6.00~6.50													0	0.0	33897	100.0		
5.50~6.00									1				1	0.0	33897	100.0		
5.00~5.50								1	2				3	0.0	33896	100.0		
4.50~5.00						1		7	1		2		11	0.0	33893	100.0		
4.00~4.50						9		9	2	1	2		23	0.1	33882	100.0		
3.50~4.00						2	30	6	2	1	6	1	49	0.1	33859	99.9		
3.00~3.50						20	62	7	2	4	1	2	101	0.3	33810	99.7		
2.50~3.00				6	105	83		8	10	10	6	7	7	1	33709	99.4		
2.00~2.50				70	281	107	44	49	37	20	14	13	2	637	33459	98.7		
1.75~2.00				175	200	85	59	62	51	15	10	4	2	2	32822	96.8		
1.50~1.75			11	299	277	165	130	104	58	53	25	8	1	1131	32168	94.9		
1.25~1.50			108	512	415	262	201	186	120	80	33	5	2	1	1925	31037	91.6	
1.00~1.25		1	383	667	594	489	408	308	170	64	23	2	1	3110	29112	85.9		
0.75~1.00		61	883	988	906	917	739	403	177	50	15	4		5123	26002	76.7		
0.50~0.75	1	581	1574	1419	1711	1779	1196	550	191	49	10	2		9063	20879	61.6		
0.25~0.50	3	1035	2213	1702	1759	1789	1029	418	106	21	4	2		10081	11816	34.9		
0.00~0.25		131	635	524	275	111	32	15	9	3				1735	5.1	5.1		
出現度數	4	1809	5807	6342	6545	5989	3875	2104	936	368	148	50	15	5	0	0	33897	100
出現率 (%)	0.0	5.3	17.1	18.7	19.3	17.4	11.4	6.2	2.8	1.1	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0		
累積度數	4	1813	7620	13962	20507	26396	30271	32275	33311	33679	33827	33877	33892	33897	33897	33897		
累積率 (%)	0.0	5.3	22.5	41.2	60.5	77.9	88.3	95.5	98.3	99.4	99.8	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0		

四期代表数	1.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	19
代表数之和	6	6331.5	2631.5	34881	42542.5	44167.5	32937.5	19988	9628	4232	1850	675	217.5	77.5	0	0	0	0

波高	平均值	0.7717	日
	標準偏差	0.51	
周期	$\bar{\tau}$	0.60199	s
	標準偏差	0.4404	
算出波率	平均值	6.60429	
	標準偏差	1.85	
波高 $1/3$	$\bar{\tau}$	0.27485	日
	λ	1.64995	
算出波率		0.98	
波高 $1/3$		2.175	

表-3 八戸 波高・周期別度数分布

周期階級 波高階級	0.0~ 3.0	3.0~ 4.0	4.0~ 5.0	5.0~ 6.0	6.0~ 7.0	7.0~ 8.0	8.0~ 9.0	9.0~ 10.0	10.0~ 11.0	11.0~ 12.0	12.0~ 13.0	13.0~ 14.0	14.0~ 15.0	15.0~ 16.0	16.0~ 17.0	17.0~ 18.0	18.0~ 19.0	出現度数	出現率 (%)	累積度数	累積率 (%)
12 12.00~																		0	0.0	65752	100.0
11.5 11.00~12.00																		0	0.0	65752	100.0
10.5 10.00~11.00																		0	0.0	65752	100.0
9.5 9.00~10.00																		0	0.0	65752	100.0
8.5 8.00~9.00																		0	0.0	65752	100.0
7.5 7.00~8.00																		0	0.0	65752	100.0
6.75 6.50~7.00																		0	0.0	65752	100.0
6.25 6.00~6.50												1						1	0.0	65752	100.0
5.75 5.50~6.00										2	2	5						11	0.0	65751	100.0
5.25 5.00~5.50										3	10	5	8					37	0.1	65740	100.0
4.75 4.50~5.00						1	13	15	18	10	20	6		1				84	0.1	65703	99.9
4.25 4.00~4.50						2	28	27	29	13	21	4			1			125	0.2	65619	99.8
3.75 3.50~4.00						20	54	38	36	25	24	25	7	4				233	0.4	65494	99.6
3.25 3.00~3.50						10	93	110	69	66	58	39	19	6	1	3		474	0.7	65261	99.3
2.75 2.50~3.00					1	89	229	181	161	131	123	62	31	4	5			1017	1.5	64787	98.5
2.25 2.00~2.50					44	354	448	398	294	216	208	97	43	10	2			2104	3.2	63770	97.0
1.975 1.75~2.00				2	115	396	396	295	235	164	141	75	31	8	4			1512	2.3	61466	93.8
1.625 1.50~1.75				18	353	631	503	386	354	263	217	114	47	6	3			2895	4.4	59754	90.9
1.375 1.25~1.50				1	105	771	954	693	539	390	240	127	42	13	1			4455	6.8	56859	86.5
1.125 1.00~1.25				1	20	683	1762	1540	1251	967	817	449	282	136	52	10	1	7961	12.1	52404	79.7
0.875 0.75~1.00						250	1716	2786	2363	1968	1617	904	539	273	121	54	1	12811	19.2	44443	67.6
0.625 0.50~0.75				17	725	2609	3751	3833	3424	2323	1268	592	300	122	36	5	1	19002	28.9	31832	48.4
0.375 0.25~0.50				57	561	1657	2555	2671	2264	1380	663	339	142	72	15	2		13278	18.8	12830	19.5
0.125 0.00~0.25				142	38	46	61	44	35	22	15	19	14	12	3	1		452	0.7	452	0.7
出現度数	217	1585	6636	12189	12885	11327	8862	5449	3246	2054	1049	422	90	24	5	0	0	65752			
出現率 (%)	0.3	2.4	10.4	18.5	19.6	17.2	12.7	8.3	4.9	3.1	1.6	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0				
累積度数	217	1812	8648	20837	33722	45049	53411	58860	62108	64162	65211	65533	65723	65747	65762	65762	65762				
累積率 (%)	0.3	2.8	13.2	31.7	51.3	68.5	81.2	89.5	94.5	97.6	99.2	99.8	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0				

出典：港湾技術資料No.744

原時代表理 1.5 3.5 4.5 5.5 6.5 7.5 8.5 9.5 10.5 11.5 12.5 13.5 14.5 15.5 16.5 17.5 18.5 19
代表値×頻度 325.5 5582.5 30762 67039.5 83752.5 84852.5 71077 51765.5 34104 23621 13112.5 5697 1305 372 82.5 0 0 0

波高	平均値	0.94475 m
標準偏差	0.63	
λ	0.50031	
λ	-0.2311	
平均値	7.20208 s	
標準偏差	2.04	
λ	0.2778	
λ	1.93578	
算出標準	0.88	
算出標準	2.625 m	

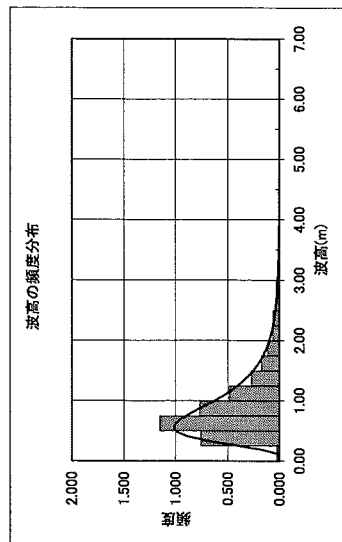


表-4 古 波高・周期別度数分布

波高階級 波高階級	0.0~ 3.0	3.0~ 4.0	4.0~ 5.0	5.0~ 6.0	6.0~ 7.0	7.0~ 8.0	8.0~ 9.0	9.0~ 10.0	10.0~ 11.0	11.0~ 12.0	12.0~ 13.0	13.0~ 14.0	14.0~ 15.0	15.0~ 16.0	16.0~ 17.0	17.0~ 18.0	18.0~ 19.0	19.0~ 20.0	出現度数	出現率 (%)	累積度数	累積率 (%)	代表値×頻度	波高代表値	階級
12 12.00~																			0	0.0	24488	100.0	0.0	13	1
11.5 11.00~12.00																			0	0.0	24488	100.0	0.0	12	2
10.5 10.00~11.00																			0	0.0	24488	100.0	0.0	11	3
9.5 9.00~10.00																			0	0.0	24488	100.0	0.0	10	4
8.5 8.00~9.00																			0	0.0	24488	100.0	0.0	9	5
7.5 7.00~8.00																			0	0.0	24488	100.0	0.0	8	6
6.75 6.50~7.00																			0	0.0	24488	100.0	0.0	7	7
6.25 6.00~6.50																			0	0.0	24488	100.0	0.0	6.5	8
5.75 5.50~6.00																			0	0.0	24488	100.0	0.0	6	9
5.25 5.00~5.50																			0	0.0	24488	100.0	0.0	5.5	10
4.75 4.50~5.00									1	1									2	0.0	24488	100.0	9.5	5	11
4.25 4.00~4.50									1										1	0.0	24488	100.0	4.3	4.5	12
3.75 3.50~4.00							2	1	2	1									6	0.0	24485	100.0	22.5	4	13
3.25 3.00~3.50						1	5	14	4	2									26	0.1	24479	100.0	84.5	3.5	14
2.75 2.50~3.00						3	20	20	7	5	2								57	0.2	24453	99.9	156.8	3	15
2.25 2.00~2.50						7	31	59	42	18	12	8							177	0.7	24396	99.6	398.3	2.5	16
1.875 1.75~2.00						7	37	53	23	13	10	1							150	0.6	24219	98.9	281.3	2	17
1.625 1.50~1.75						1	3	40	70	58	17	1							251	1.0	24069	98.3	407.9	1.75	18
1.375 1.25~1.50						3	47	128	117	74	56	31	30	18	3	1			508	2.1	23818	97.3	698.5	1.5	19
1.125 1.00~1.25						15	129	362	216	112	69	80	55	32	11	1			1062	4.4	23310	95.2	1217.3	1.25	20
0.875 0.75~1.00						5	130	587	830	337	221	149	98	81	39	13	3	1	2492	10.2	22228	90.8	2180.5	1	21
0.625 0.50~0.75						3	77	511	1575	1221	552	438	238	168	95	37	6	4	4927	20.1	19736	80.6	3079.4	0.75	22
0.375 0.25~0.50						44	423	1640	2571	1703	1283	797	499	194	83	23	5		9275	37.9	14809	60.5	3478.1	0.5	23
0.125 0.00~0.25						45	431	1386	1661	1072	568	256	86	17	8	3	1		5534	22.6	5534	22.6	691.8	0.25	24
出現度数	92	936	3686	6573	5370	3225	2095	1222	675	400	162	40	9	3	0	0	0	0	24488						
出現率 (%)	0.4	3.8	15.1	26.8	21.9	13.2	8.6	5.0	2.8	1.6	0.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0							
累積度数	92	1028	4714	11287	16657	19882	21977	23199	23874	24274	24436	24476	24485	24488	24488	24488	24488	24488							
累積率 (%)	0.4	4.2	19.3	46.1	68.0	81.2	89.7	94.7	97.5	99.1	99.8	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0							

出典：港湾技術資料No744

周波代表値 1.5 3.5 4.5 5.5 6.5 7.5 8.5 9.5 10.5 11.5 12.5 13.5 14.5 15.5 16.5 17.5 18.5 19

代表値×頻度 138 3276 16587 36151.5 34905 24187.5 17807.5 11609 7087.5 4600 2025 540 130.5 46.5 0 0 0 0

波高	平均値	0.51805 m
	標準偏差	0.38
	ζ	0.65511
	λ	-0.8704
周期	平均値	6.49689 s
	標準偏差	1.42
	ζ	0.27487
	λ	1.83552
算出波率		0.98
波高 $H_{1/10}$		1.525 m

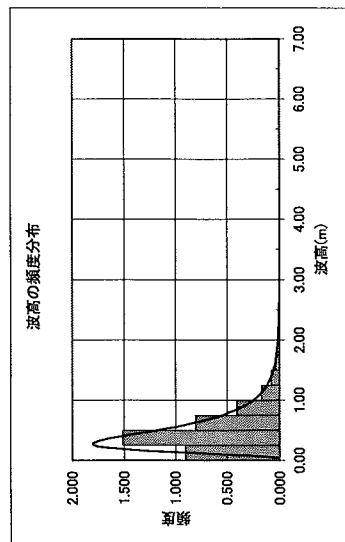


表-5 金石 波高・周期別度数分布

周階級 波高階級		(階級別出現度数)																		累積率 (%)										
0.0~ 3.0	3.0~ 4.0	4.0~ 5.0	5.0~ 6.0	6.0~ 7.0	7.0~ 8.0	8.0~ 9.0	9.0~ 10.0	10.0~ 11.0	11.0~ 12.0	12.0~ 13.0	13.0~ 14.0	14.0~ 15.0	15.0~ 16.0	16.0~ 17.0	17.0~ 18.0	18.0~ 19.0	19.0~ 20.0	出現度数	出現率 (%)	累積度数	累積率 (%)									
12.00~																			0	0.0	43598	100.0								
11.00~12.00																											0	0.0	43598	100.0
10.00~11.00																											0	0.0	43598	100.0
9.00~10.00																											0	0.0	43598	100.0
8.00~9.00																											0	0.0	43598	100.0
7.00~8.00																											0	0.0	43598	100.0
6.50~7.00																											0	0.0	43598	100.0
6.00~6.50																											0	0.0	43598	100.0
5.50~6.00																											0	0.0	43598	100.0
5.00~5.50																											5	1		
4.50~5.00																											2	4		
4.00~4.50																											2	4		
3.50~4.00																											7	33		
3.00~3.50																											6	29		
2.50~3.00																											4	22		
2.00~2.50																											1	28		
1.75~2.00																											3	42		
1.50~1.75																											6	102		
1.25~1.50																											37	276		
1.00~1.25																											2	7		
0.75~1.00																											1	3		
0.50~0.75																											85	520		
0.25~0.50																											41	700		
0.00~0.25																											51	14		
出現度数																											93	804		
出現率 (%)																											0.2	1.8		
累積度数																											93	897		
累積率 (%)																											0.2	2.1		

2.000

代表値×頻度 波高代表値

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24

0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
31.5
133.0
225.3
446.3
718.3
1245.8
2362.5
2049.4
2858.4
3892.6
4959.0
5936.0
7529.9
4633.1
49.4

出典：港湾技術資料No.744

波高の頻度分布

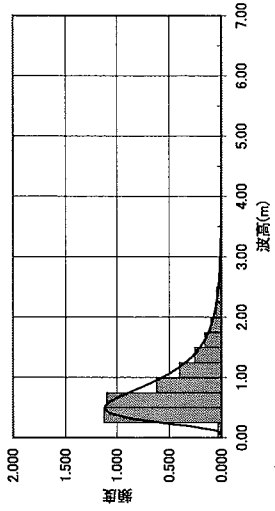


表-6 仙台新港 波高・周期別度数分布

周期別波高 波高階級	0.0~ 3.0	3.0~ 4.0	4.0~ 5.0	5.0~ 6.0	6.0~ 7.0	7.0~ 8.0	8.0~ 9.0	9.0~ 10.0	10.0~ 11.0	11.0~ 12.0	12.0~ 13.0	13.0~ 14.0	14.0~ 15.0	15.0~ 16.0	16.0~ 17.0	17.0~ 18.0	18.0~ 19.0	19.0~ 20.0	出現度数	出現率 (%)	累積度数	累積率 (%)
12 12.00~																			0	0.0	42117	100.0
11.5 11.00~12.00																			0	0.0	42117	100.0
10.5 10.00~11.00																			0	0.0	42117	100.0
9.5 9.00~10.00																			0	0.0	42117	100.0
8.5 8.00~9.00																			0	0.0	42117	100.0
7.5 7.00~8.00																			0	0.0	42117	100.0
6.5 6.50~7.00																			0	0.0	42117	100.0
6.25 6.00~6.50																			0	0.0	42117	100.0
5.75 5.50~6.00																			0	0.0	42117	100.0
5.25 5.00~5.50								2	2	1									5	0.0	42117	100.0
4.75 4.50~5.00								2	1	3	1	2							9	0.0	42112	100.0
4.25 4.00~4.50							3	5	2	5	3	1							19	0.0	42103	100.0
3.75 3.50~4.00						1	8	10	7	12	5	3	1						47	0.1	42084	99.9
3.25 3.00~3.50						5	10	7	23	15	13	13	5	1					92	0.2	42037	99.8
2.75 2.50~3.00					8	15	20	42	48	57	31	14	8	2					245	0.6	41945	99.6
2.25 2.00~2.50				14	45	61	86	177	119	104	52	13	14						685	1.6	41709	99.0
1.75 1.50~2.00				53	60	89	153	164	125	82	33	27	8	1					795	1.9	41015	97.4
1.625 1.50~1.75			7	97	101	177	243	289	221	106	51	14	4		1	1			1322	3.1	40220	95.5
1.375 1.25~1.50		1	56	182	271	457	549	469	330	148	51	11	5		2	1			2533	6.0	38998	92.4
1.125 1.00~1.25		2	174	394	573	972	1013	689	396	189	58	16	7	1	1				4485	10.6	36365	86.3
0.875 0.75~1.00	1	46	410	850	1526	2119	1573	839	598	238	110	40	12	1					8273	19.6	31860	75.7
0.625 0.50~0.75	34	160	711	1577	2756	3081	1961	1259	687	340	133	44	10	2	1				12756	30.3	23807	56.1
0.375 0.25~0.50	149	356	594	1099	1714	1811	1591	1095	573	175	59	22	6						9244	21.9	10851	25.8
0.125 0.00~0.25	29	103	207	297	366	334	183	65	17	4	1	1							1607	3.8	1607	3.8
出現度数	213	668	2169	4563	7420	9122	7393	5124	3089	1479	601	221	80	8	5	2	0	0	42117			
出現率 (%)	0.5	1.6	5.1	10.8	17.6	21.7	17.6	12.2	7.3	3.5	1.4	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
累積度数	213	881	3040	7603	15023	24145	31538	36662	39721	41200	41801	42022	42102	42110	42115	42117	42117	42117				
累積率 (%)	0.5	2.1	7.2	18.1	35.7	57.3	74.9	87.0	94.3	97.8	98.2	98.8	99.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0				

出典：港湾技術資料744

波高の頻度分布

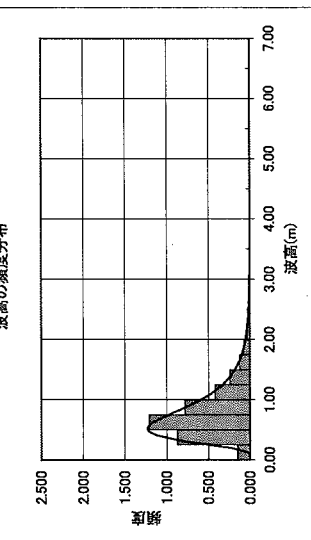


表-7 相馬 波高・周期別度数分布

周期階級 波高階級	0.0~ 3.0	3.0~ 4.0	4.0~ 5.0	5.0~ 6.0	6.0~ 7.0	7.0~ 8.0	8.0~ 9.0	9.0~ 10.0	10.0~ 11.0	11.0~ 12.0	12.0~ 13.0	13.0~ 14.0	14.0~ 15.0	15.0~ 16.0	16.0~ 17.0	17.0~ 18.0	18.0~ 19.0	出現度数	出現率 (%)	累積度数	累積率 (%)		
12.00~	(階級別出現度数)																			0	0.0	30897	100.0
11.00~12.00																			0	0.0	30897	100.0	
10.00~11.00																			0	0.0	30897	100.0	
9.00~10.00																			0	0.0	30897	100.0	
8.00~9.00																			0	0.0	30897	100.0	
7.00~8.00																			0	0.0	30897	100.0	
6.50~7.00																			0	0.0	30897	100.0	
6.00~6.50																			0	0.0	30897	100.0	
5.50~6.00																			0	0.0	30897	100.0	
5.00~5.50											1								1	0.0	30897	100.0	
4.50~5.00									1	3	2		1						7	0.0	30896	100.0	
4.00~4.50								2	5	7	2	2	5						23	0.1	30889	100.0	
3.50~4.00								4	8	12	9	10	8	3					54	0.2	30866	99.9	
3.00~3.50																			122	0.4	30812	99.7	
2.50~3.00																							
2.00~2.50																			342	1.1	30690	99.3	
1.75~2.00																			928	3.0	30348	96.2	
1.50~1.75																			943	3.1	29420	95.2	
1.25~1.50																			1664	5.4	28477	92.2	
1.00~1.25																			2660	8.6	26813	86.8	
0.75~1.00																			4715	15.3	24153	78.2	
0.50~0.75																			7087	22.9	19438	62.9	
0.25~0.50																			8589	27.8	12351	40.0	
0.00~0.25																			3705	12.0	3762	12.2	
出現度数																			57	0.2	57	0.2	
出現率 (%)																			30897				
累積度数																							
累積率 (%)																							

出典：港湾技術資料No.744

波高 1.5 3.5 4.5 5.5 6.5 7.5 8.5 9.5 10.5 11.5 12.5 13.5 14.5 15.5 16.5 17.5 18.5 19
代表値×頻度 130.5 2492 9819 30443.5 37797.5 47077.5 42658 32119.5 19876.5 11523 6762.5 3172.5 1087.5 387.5 62.5 35 0 0

波高の頻度分布

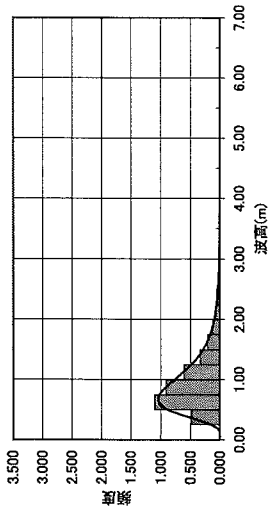


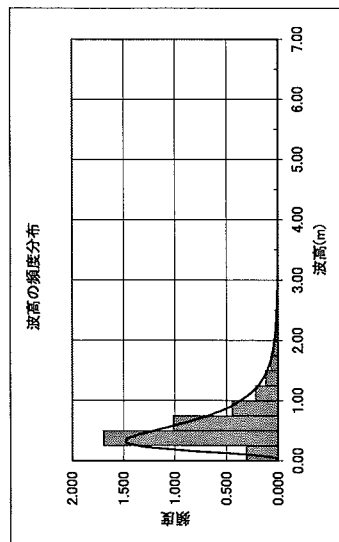
表-8 小名浜 波高・周期別度数分布

周期階級 波高階級	0.0~ 3.0	3.0~ 4.0	4.0~ 5.0	5.0~ 6.0	6.0~ 7.0	7.0~ 8.0	8.0~ 9.0	9.0~ 10.0	10.0~ 11.0	11.0~ 12.0	12.0~ 13.0	13.0~ 14.0	14.0~ 15.0	15.0~ 16.0	16.0~ 17.0	17.0~ 18.0	18.0~ 19.0	出現度数	出現率 (%)	累積度数	累積率 (%)
12.00~	(階級別出現度数)																				
11.00~12.00																		0	0.0	32249	100.0
10.00~11.00																		0	0.0	32249	100.0
9.00~10.00																		0	0.0	32249	100.0
8.00~9.00																		0	0.0	32249	100.0
7.00~8.00																		0	0.0	32249	100.0
6.50~7.00												1						1	0.0	32249	100.0
6.00~6.50									1			1						3	0.0	32248	100.0
5.50~6.00								2	3	4	2	1	3					15	0.0	32245	100.0
5.00~5.50										3	4			1				8	0.0	32230	99.9
4.50~5.00								5	6	6	1	3	4		1			26	0.1	32222	99.9
4.00~4.50						1	7	8	12	5	4	9	6	1				53	0.2	32196	99.8
3.50~4.00						2	14	18	28	7	13	14	2	4				102	0.3	32143	99.7
3.00~3.50						9	53	61	43	11	32	14	1	1				225	0.7	32041	99.4
2.50~3.00						8	61	133	136	89	67	30	15					539	1.7	31816	98.7
2.00~2.50				11	93	211	338	315	144	90	56	8	2					1268	3.9	31277	97.0
1.75~2.00				27	146	313	334	247	119	67	19	9						1281	4.0	30009	93.1
1.50~1.75			4	74	369	654	558	351	150	67	25	7						2259	7.0	28728	89.1
1.25~1.50			30	235	810	1073	1013	487	169	84	25	3						3929	12.2	26469	82.1
1.00~1.25		6	96	542	1475	1897	1330	602	238	81	20	4	3					6394	19.5	22540	69.9
0.75~1.00		26	283	1032	2283	2562	1371	520	177	54	21	5	1					8335	25.8	16246	50.4
0.50~0.75	8	76	300	1003	1944	1746	929	322	102	27	2	2						6461	20.0	7911	24.5
0.25~0.50	1	49	140	311	465	344	102	27	9	1								1449	4.5	1450	4.5
0.00~0.25																		1	0.0	1	0.0
出現度数	9	157	853	3235	7594	8873	6182	3101	1289	575	254	95	24	7	1	0	0	32249			
出現率 (%)	0.0	0.5	2.6	10.0	23.5	27.5	19.2	9.6	4.0	1.8	0.8	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0				
累積度数	9	166	1019	4254	11848	20721	26903	30004	31293	31868	32122	32217	32241	32248	32249	32249	32249				
累積率 (%)	0.0	0.5	3.2	13.2	36.7	64.3	83.4	93.0	97.0	98.8	99.6	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0				

出典：海洋技術研究所7/24

波高 代表値 1.5 3.5 4.5 5.5 6.5 7.5 8.5 9.5 10.5 11.5 12.5 13.5 14.5 15.5 16.5 17.5 18.5 19
 代表値×頻度 13.5 545.5 3838.5 17792.5 49361 66547.5 52547 29469.5 13534.5 6812.5 3175 1282.5 348 108.5 16.5 0 0 0

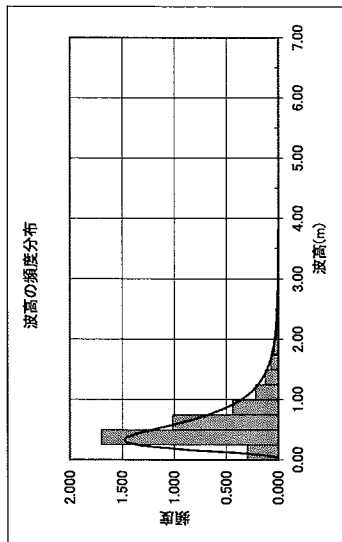
波高	平均値	1.12816
標準偏差	σ	0.57
λ	0.47682	
周期	平均値	7.60292 s
標準偏差	σ	1.56
λ	0.23307	
算出波高	λ	2.00731
波高	算出波高	2.650



何那羅和 9-1 族

[illegible]

出典：港灣技術資料No744



波高	平均値	1.1987
	標準偏差	0.59
	λ	0.46576
周期	平均値	7.61432
	標準偏差	1.65
	λ	0.2142
算出速率		2.00715
波高		2.775

年度	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052	2053	2054	2055	2056	2057	2058	2059	2060	2061	2062	2063	2064	2065	2066	2067	2068	2069	2070	2071	2072	2073	2074	2075	2076	2077	2078	2079	2080	2081	2082	2083	2084	2085	2086	2087	2088	2089	2090	2091	2092	2093	2094	2095	2096	2097	2098	2099	2100	2101	2102	2103	2104	2105	2106	2107	2108	2109	2110	2111	2112	2113	2114	2115	2116	2117	2118	2119	2120	2121	2122	2123	2124	2125	2126	2127	2128	2129	2130	2131	2132	2133	2134	2135	2136	2137	2138	2139	2140	2141	2142	2143	2144	2145	2146	2147	2148	2149	2150	2151	2152	2153	2154	2155	2156	2157	2158	2159	2160	2161	2162	2163	2164	2165	2166	2167	2168	2169	2170	2171	2172	2173	2174	2175	2176	2177	2178	2179	2180	2181	2182	2183	2184	2185	2186	2187	2188	2189	2190	2191	2192	2193	2194	2195	2196	2197	2198	2199	2200	2201	2202	2203	2204	2205	2206	2207	2208	2209	2210	2211	2212	2213	2214	2215	2216	2217	2218	2219	2220	2221	2222	2223	2224	2225	2226	2227	2228	2229	2230	2231	2232	2233	2234	2235	2236	2237	2238	2239	2240	2241	2242	2243	2244	2245	2246	2247	2248	2249	2250	2251	2252	2253	2254	2255	2256	2257	2258	2259	2260	2261	2262	2263	2264	2265	2266	2267	2268	2269	2270	2271	2272	2273	2274	2275	2276	2277	2278	2279	2280	2281	2282	2283	2284	2285	2286	2287	2288	2289	2290	2291	2292	2293	2294	2295	2296	2297	2298	2299	2300	2301	2302	2303	2304	2305	2306	2307	2308	2309	2310	2311	2312	2313	2314	2315	2316	2317	2318	2319	2320	2321	2322	2323	2324	2325	2326	2327	2328	2329	2330	2331	2332	2333	2334	2335	2336	2337	2338	2339	2340	2341	2342	2343	2344	2345	2346	2347	2348	2349	2350	2351	2352	2353	2354	2355	2356	2357	2358	2359	2360	2361	2362	2363	2364	2365	2366	2367	2368	2369	2370	2371	2372	2373	2374	2375	2376	2377	2378	2379	2380	2381	2382	2383	2384	2385	2386	2387	2388	2389	2390	2391	2392	2393	2394</
----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	--------

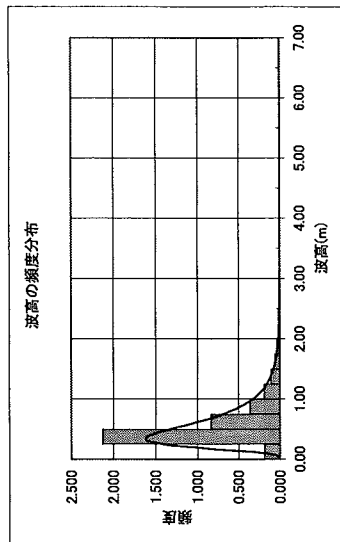
表-10 浜金谷 波高・周期別度数分布

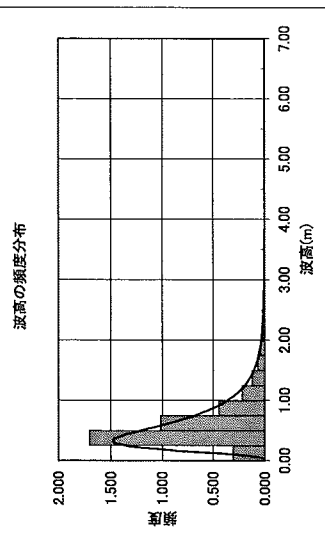
周期間波 波高階級	階級別出現度数																出現率 (%)	累積度数	累積率		
	0.0~ 3.0	3.0~ 4.0	4.0~ 5.0	5.0~ 6.0	6.0~ 7.0	7.0~ 8.0	8.0~ 9.0	9.0~ 10.0	10.0~ 11.0	11.0~ 12.0	12.0~ 13.0	13.0~ 14.0	14.0~ 15.0	15.0~ 16.0	16.0~ 17.0	17.0~ 18.0				18.0~ 19.0	19.0~
12.00~																		0	0.0	69887	100.0
11.00~12.00																		0	0.0	69887	100.0
10.00~11.00																		0	0.0	69887	100.0
9.00~10.00																		0	0.0	69887	100.0
8.00~9.00																		0	0.0	69887	100.0
7.00~8.00										1								1	0.0	69887	100.0
6.50~7.00																		0	0.0	69886	100.0
6.00~6.50																		0	0.0	69886	100.0
5.50~6.00																		0	0.0	69886	100.0
5.00~5.50									1									1	0.0	69886	100.0
4.50~5.00																		0	0.0	69885	100.0
4.00~4.50								1	1									3	0.0	69885	100.0
3.50~4.00					1			3	1	1								6	0.0	69882	100.0
3.00~3.50					8	17		7	2									34	0.0	69876	100.0
2.50~3.00				2	89	39	14	6	3									153	0.2	69642	99.9
2.00~2.50				212	343	59	16	9	6	2	5	1	1					659	0.9	69489	99.7
1.75~2.00			7	472	186	30	11	12	6	2	4	1						731	1.0	69830	98.8
1.50~1.75	1	87	764	190	42	23	25	6	7	8	4	1	1					1159	1.7	68059	97.7
1.25~1.50	8	620	811	233	91	72	41	11	21	20	13	2				1		1944	2.8	66940	96.1
1.00~1.25	192	1363	946	352	219	146	71	42	43	42	14	3	1					3434	4.9	64996	93.3
0.75~1.00	1	1279	2101	1133	741	510	297	133	94	93	34	9	2	2				6429	9.2	61562	88.3
0.50~0.75	228	4908	2899	2569	2229	1194	544	287	133	54	17	4	1					14667	21.0	55133	79.1
0.25~0.50	1603	10385	12678	8216	3106	818	243	50	19	4	2							37102	53.2	40466	58.1
0.00~0.25	98	1187	1577	431	60	8	3											3364	4.8	3364	4.8
出現度数	1930	17540	21330	15551	7538	3027	1380	637	323	228	132	46	10	4	0	1	0	0	69887		
出現率 (%)	2.8	25.2	30.6	22.3	10.8	4.3	2.0	0.9	0.5	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
累積度数	1930	19470	40800	56361	63899	66626	68066	68943	69266	69494	69626	69672	69682	69686	69687	69687	69687				
累積率 (%)	2.8	27.9	58.5	80.9	91.7	96.0	98.0	98.9	99.4	99.7	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0				

出典：海洋技術研究所7/4

周期待数値 1.5 3.5 4.5 5.5 6.5 7.5 8.5 9.5 10.5 11.5 12.5 13.5 14.5 15.5 16.5 17.5 18.5 19
代表値×頻度 2895 61390 55865 85385.5 48997 22702.5 11730 6051.5 3391.5 2622 1650 621 145 62 0 17.5 0 0 0

波高	平均値	0.58603 m
	標準偏差	0.381
	λ	-0.7132
周期	平均値	4.93414 s
	標準偏差	1.48
	λ	0.23551
	算出標準	1.5531
	波高 H_s	1.625 m



[illegible]

出典：港灣技研資料No744

	1.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	19				
高田代表値																						
平均値	0	0	7	922	5	6792	5	15054	14707	5	9741	4436	5	2037	1104	312	5	81	0	0	0	0

波高	平均値	0.90737	S
	標準偏差	0.42	
周期	λ	0.4406	S
	λ	0.1943	
算出波率	平均値	7.21227	S
	標準偏差	1.4	
波高	λ	0.19232	S
	λ	1.95729	
算出波率		0.98	
波高		2.00	

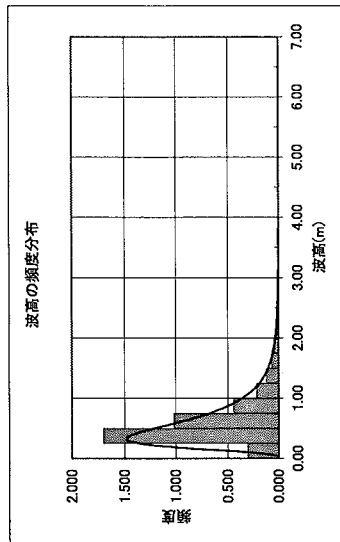
表-12 潮位高・周期別度数分布

周期階級 波高階級		0.0~ 3.0	3.0~ 4.0	4.0~ 5.0	5.0~ 6.0	6.0~ 7.0	7.0~ 8.0	8.0~ 9.0	9.0~ 10.0	10.0~ 11.0	11.0~ 12.0	12.0~ 13.0	13.0~ 14.0	14.0~ 15.0	15.0~ 16.0	16.0~ 17.0	17.0~ 18.0	18.0~ 19.0	出現度数	出現率 (%)	累積度数	累積率 (%)	代表値×頻度	波高代表値	階級										
12.00~		(階級別出現度数)																							0	0.0	6668	100.0	0.0	13	1				
11.00~12.00																									0	0.0	6668	100.0	0.0	12	2				
10.00~11.00																									0	0.0	6668	100.0	0.0	11	3				
9.00~10.00																									0	0.0	6668	100.0	0.0	10	4				
8.00~9.00																									0	0.0	6668	100.0	0.0	9	5				
7.00~8.00																									0	0.0	6668	100.0	0.0	8	6				
6.50~7.00																									0	0.0	6668	100.0	0.0	7	7				
6.00~6.50																									0	0.0	6668	100.0	0.0	6.5	8				
5.50~6.00																									0	0.0	6668	100.0	0.0	6	9				
5.00~5.50																									0	0.0	6668	100.0	0.0	5.5	10				
4.50~5.00																									0	0.0	6668	100.0	0.0	5	11				
4.00~4.50																									0	0.0	6668	100.0	0.0	4.5	12				
3.50~4.00																									5	0.1	6668	100.0	18.8	4	13				
3.00~3.50																									25	0.4	6663	99.9	81.3	3.5	14				
2.50~3.00																									55	0.8	6638	99.6	151.3	3	15				
2.00~2.50																									94	1.4	6593	98.7	211.5	2.5	16				
1.75~2.00																									115	1.7	6489	97.3	215.5	2	17				
1.50~1.75																									215	3.2	6374	95.6	349.4	1.75	18				
1.25~1.50																									354	5.3	6159	92.4	486.8	1.5	19				
1.00~1.25																									652	9.8	5805	87.1	733.5	1.25	20				
0.75~1.00																									1109	16.6	5153	77.3	970.4	1	21				
0.50~0.75																									2089	31.3	4044	60.6	1305.6	0.75	22				
0.25~0.50																									1947	29.2	1955	29.3	730.1	0.5	23				
0.00~0.25																									8	0.1	8	0.1	1.0	0.25	24				
出現度数																									6668										
出現率 (%)																																			
累積度数																									6668										
累積率 (%)																									100.0										

2.000

周波代表値 1.5 3.5 4.5 5.5 6.5 7.5 8.5 9.5 10.5 11.5 12.5 13.5 14.5 15.5 16.5 17.5 18.5 19
 代表値×頻度 198 1463 5681 7837.5 8807.5 7095 4930 2593.5 1270.5 966 475 310.5 203 15.5 0 0 0 0

波高	平均値	0.73811m
標準偏差	σ	0.48
λ	λ	0.54145
λ	λ	-0.3947
λ	λ	6.27255s
λ	λ	1.32
λ	λ	0.24520
λ	λ	1.73160
λ	λ	0.58
λ	λ	2.023m



出典：港研技研資料0744

表-13 潮解 波高・周期別度数分布

周期階級 波高階級		(階級別出現度数)																		出現度数	出現率 (%)	累積度数	累積率 (%)	
12	12.00~																			0	0.0	12695	100.0	
11.5	11.00~12.00																							
10.5	10.00~11.00																				0	0.0	12695	100.0
9.5	9.00~10.00																				0	0.0	12695	100.0
8.5	8.00~9.00																				0	0.0	12695	100.0
7.5	7.00~8.00																				5	0.0	12695	100.0
6.75	6.50~7.00																				2	0.0	12690	100.0
6.25	6.00~6.50																				1	0.0	12688	99.9
5.75	5.50~6.00																				3	0.0	12687	99.9
5.25	5.00~5.50																				0	0.0	12684	99.9
4.75	4.50~5.00																				7	0.1	12684	99.9
4.25	4.00~4.50																				11	0.1	12677	99.9
3.75	3.50~4.00																				28	0.2	12666	99.8
3.25	3.00~3.50																				60	0.5	12638	99.6
2.75	2.50~3.00																				139	1.1	12578	99.1
2.25	2.00~2.50																				297	2.3	12439	98.0
1.875	1.75~2.00																				645	5.1	12142	95.6
1.625	1.50~1.75																				438	3.9	11497	90.6
1.375	1.25~1.50																				762	6.0	10999	86.6
1.125	1.00~1.25																				1245	9.8	10237	80.6
0.875	0.75~1.00																				1944	15.3	8992	70.8
0.625	0.50~0.75																				3025	23.8	7048	55.5
0.375	0.25~0.50																				3139	24.7	4023	31.7
0.125	0.00~0.25																				884	7.0	884	7.0
																					0	0.0	0	0.0

出典：港湾技術資料No744

波高の頻度分布

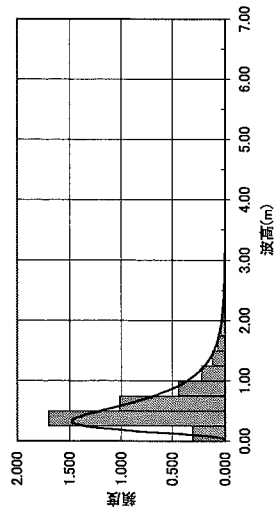


表-14 新防沖 波高・周期別度数分布

周期階級 波高階級	(潮移動出現度数)																		出現率 (%)	累積度数	累積率 (%)
	0.0~ 3.0	3.0~ 4.0	4.0~ 5.0	5.0~ 6.0	6.0~ 7.0	7.0~ 8.0	8.0~ 9.0	9.0~ 10.0	10.0~ 11.0	11.0~ 12.0	12.0~ 13.0	13.0~ 14.0	14.0~ 15.0	15.0~ 16.0	16.0~ 17.0	17.0~ 18.0	18.0~ 19.0				
12.00~																		0	0.0	19549	100.0
11.00~12.00												1						1	0.0	19549	100.0
10.00~11.00																		0	0.0	19548	100.0
9.00~10.00																		0	0.0	19548	100.0
8.00~9.00										2								2	0.0	19548	100.0
7.00~8.00										3								3	0.0	19546	100.0
6.50~7.00																		0	0.0	19543	100.0
6.00~6.50											1							1	0.0	19543	100.0
5.50~6.00									3		1							4	0.0	19542	100.0
5.00~5.50									1	1	1							4	0.0	19538	99.9
4.50~5.00								3	2	3	1		1					10	0.1	19534	99.9
4.00~4.50								6	5	5	3	1	1	2				23	0.1	19524	99.9
3.50~4.00								4	19	7	1	1	4	4				40	0.2	19501	99.8
3.00~3.50																					
										21	32	16	13	15	13	5	4	119	0.6	19461	99.5
2.50~3.00								2	41	81	55	37	17	20	39	8		300	1.5	19342	98.9
2.00~2.50								83	214	135	85	91	70	72	33	5		788	4.0	19042	97.4
1.75~2.00								248	195	104	84	61	60	60	26	1		839	4.3	18254	93.4
1.50~1.75								14	624	225	145	135	82	72	45	13	5	1361	7.0	17415	89.1
1.25~1.50								231	903	300	221	171	124	66	42	21	2	2081	10.6	16054	82.1
1.00~1.25								847	844	400	344	263	135	81	38	14	1	2367	15.2	13973	71.5
0.75~1.00								1139	790	535	550	361	166	57	35	8	1	3743	19.1	11006	56.3
0.50~0.75								43	923	875	922	945	559	162	52	11	3	4498	23.0	7263	37.2
0.25~0.50								36	237	429	535	693	412	157	35	8	1	2643	13.5	2765	14.1
0.00~0.25									7	31	48	21	8	5	2			122	0.6	122	0.6
出現度数	0	79	3398	4829	3615	3264	2193	1051	538	357	179	37	9	0	0	0	0	19549			
出現率 (%)	0.0	0.4	17.4	24.7	18.5	15.7	11.2	5.4	2.8	1.8	0.9	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
累積度数	0	79	3477	8306	11921	15185	17778	18429	18967	19324	19503	19540	19549	19549	19549	19549	19549				
累積率 (%)	0.0	0.4	17.8	42.5	61.0	77.7	88.9	94.3	97.0	98.8	99.8	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0				

出典：港研技研資料No744

周期代表値 1.5 3.5 4.5 5.5 6.5 7.5 8.5 9.5 10.5 11.5 12.5 13.5 14.5 15.5 16.5 17.5 18.5 19

代表値×頻度 0 276.5 15291 26539.5 23497.5 24480 18640.5 9884.5 5649 4105.5 2237.5 499.5 130.5 0 0 0 0 0 0

波高	平均値	1.0465 m
	標準偏差	0.8
	σ	0.5312
	λ	-0.0987
周期	平均値	6.7193 s
	標準偏差	1.81
	σ	0.2668
	λ	1.8553
算出確率		0.25
波高		2.675 m

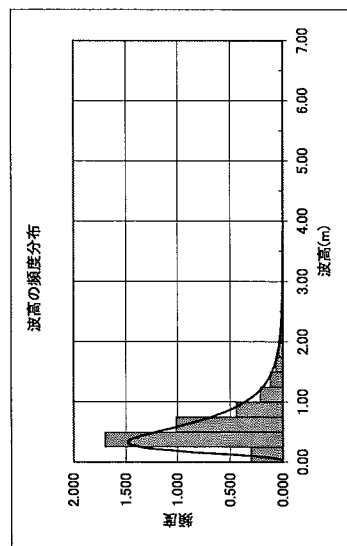


表-15 神戸港 波高・周期別度数分布

周期別波高 波高階級	(階級別出現度数)																	出現度数	出現率 (%)	累積度数	累積率 (%)
	0.0~ 3.0	3.0~ 4.0	4.0~ 5.0	5.0~ 6.0	6.0~ 7.0	7.0~ 8.0	8.0~ 9.0	9.0~ 10.0	10.0~ 11.0	11.0~ 12.0	12.0~ 13.0	13.0~ 14.0	14.0~ 15.0	15.0~ 16.0	16.0~ 17.0	17.0~ 18.0	18.0~ 19.0				
12.00~																		0	0.0	58470	100.0
11.00~12.00																		0	0.0	58470	100.0
10.00~11.00																		0	0.0	58470	100.0
9.00~10.00																		0	0.0	58470	100.0
8.00~9.00																		0	0.0	58470	100.0
7.00~8.00																		0	0.0	58470	100.0
6.50~7.00																		0	0.0	58470	100.0
6.00~6.50																		0	0.0	58470	100.0
5.50~6.00																		0	0.0	58470	100.0
5.00~5.50																		0	0.0	58470	100.0
4.50~5.00																		0	0.0	58470	100.0
4.00~4.50																		0	0.0	58470	100.0
3.50~4.00																		0	0.0	58470	100.0
3.00~3.50																		0	0.0	58470	100.0
2.50~3.00																		0	0.0	58470	100.0
2.00~2.50																		4	0.0	58470	100.0
1.75~2.00																		43	0.1	58466	100.0
1.50~1.75																		47	0.1	58423	99.9
1.25~1.50																		111	0.2	58376	99.8
1.00~1.25																		297	0.5	58265	99.6
0.75~1.00																		641	1.1	57968	99.1
0.50~0.75																		1584	2.7	57327	98.0
0.25~0.50																		5539	9.5	55743	95.3
0.00~0.25																		45349	77.6	50204	85.9
出現度数	4889	44908	7692	714	152	73	24	12	6	0	0	0	0	0	0	0	0	4855	8.3	4855	8.3
出現率 (%)	8.4	76.8	13.2	1.2	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	58470			
累積度数	4889	49797	57489	58203	58355	58428	58452	58464	58470	58470	58470	58470	58470	58470	58470	58470	58470	58470			
累積率 (%)	8.4	85.2	98.3	99.5	99.8	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0			

出典：港湾技術資料No744

周期代表値 1.5 3.5 4.5 5.5 6.5 7.5 8.5 9.5 10.5 11.5 12.5 13.5 14.5 15.5 16.5 17.5 18.5 19

代表値×頻度 7333.5 157178 34614 3927 988 547.5 204 114 63 0 0 0 0 0 0 0 0 0

波高	平均値 0.40959 m
周期	標準偏差 0.18
	λ 0.44117
	λ -0.9892
	平均値 3.50554 s
	標準偏差 0.53
	λ 0.15734
	λ 1.24304
平均波高	0.398
波高H/2	0.875 m

波高の頻度分布

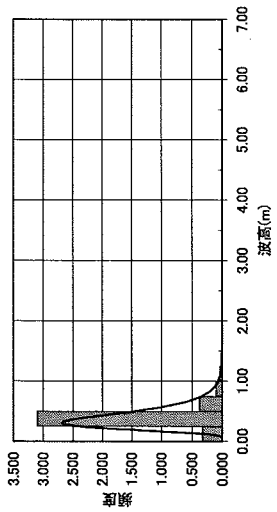


表-16 高知沖 波高・周期別度数分布

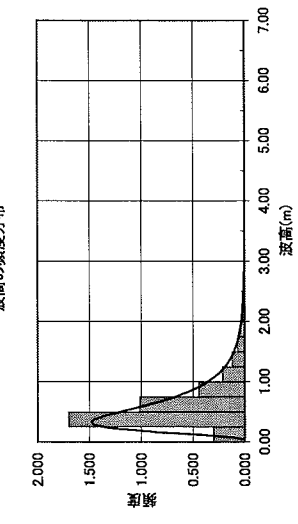
階級		代表加×制度 波高代表値																							
周期階級 波高階級	12.00～	0.0～ 3.0	3.0～ 4.0	4.0～ 5.0	5.0～ 6.0	6.0～ 7.0	7.0～ 8.0	8.0～ 9.0	9.0～ 10.0	10.0～ 11.0	11.0～ 12.0	12.0～ 13.0	13.0～ 14.0	14.0～ 15.0	15.0～ 16.0	16.0～ 17.0	17.0～ 18.0	18.0～ 19.0	19.0～	出現度数	出現率 (%)	累積度数	累積率 (%)		
11.00～12.00																				0	0.0	31124	100.0		
10.00～11.00																				0	0.0	31124	100.0		
9.00～10.00																				0	0.0	31124	100.0		
8.00～9.00												1	1	1						3	0.0	31124	100.0		
7.00～8.00										1	2									3	0.0	31121	100.0		
6.50～7.00											3	2								5	0.0	31118	100.0		
6.00～6.50										4	2	3								9	0.0	31113	100.0		
5.50～6.00											1	5	3	1						10	0.0	31104	99.9		
5.00～5.50									4	5	5	3	5	1						23	0.1	31094	99.9		
4.50～5.00								2	4	5	3	2	7	1						24	0.1	31071	99.8		
4.00～4.50								5	12	7	9	8	10	1						52	0.2	31047	99.8		
3.50～4.00								19	22	6	8	18	15	3						91	0.3	30995	99.6		
3.00～3.50												51	17	7						219	0.7	30904	99.3		
2.50～3.00								7	47	121	69	45	42	69	19	10	1			430	1.4	30685	98.6		
2.00～2.50								1	58	191	225	134	120	121	62	36	6			954	3.1	30255	97.2		
1.75～2.00								1	83	201	191	139	116	62	31	13	6	1		844	2.7	29301	94.1		
1.50～1.75								5	169	294	237	170	122	66	43	8	2			1116	3.6	28457	91.4		
1.25～1.50									55	366	434	372	234	149	71	36	6			1723	5.5	27341	87.8		
1.00～1.25									26	228	628	746	566	423	170	100	40	8		2935	9.4	25618	82.3		
0.75～1.00									159	507	1083	1286	1145	532	238	90	21	5	1		5067	16.3	22893	72.9	
0.50～0.75									31	445	884	1579	2364	1946	1015	320	61	9	1		8655	27.8	17616	56.6	
0.25～0.50									34	498	1091	1621	2306	1795	782	231	43	8	1		8410	27.0	8961	28.8	
0.00～0.25										21	109	180	163	53	22	3					551	1.8	551	1.8	
出現度数	0	65	1149	2881	5774	8048	6729	3589	1569	717	410	153	38	2	0	0	0	0	0	31124					
出現率 (%)	0.0	0.2	3.7	9.3	18.6	25.9	21.6	11.5	5.0	2.3	1.3	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0						
累積度数	0	65	1214	4095	9869	17917	24646	28235	29804	30521	30931	31084	31122	31124	31124	31124	31124	31124	31124						
累積率 (%)	0.0	0.2	3.9	13.2	31.7	57.6	79.2	90.7	95.8	98.1	99.4	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0						

2.000

周期待数値 1.5 3.5 4.5 5.5 6.5 7.5 8.5 9.5 10.5 11.5 12.5 13.5 14.5 15.5 16.5 17.5 18.5 19.5
 代表値×周度 0 227.5 5170.5 15845.5 37631 60350 57196.5 94095.5 16474.5 8245.5 5125 2055.5 551 31 0 0 0 0 0

波高	平均値	0.87283
	標準偏差	0.63
	λ	0.64758
	λ	-0.3457
周期	平均値	7.80488
	標準偏差	1.65
	λ	0.21282
	λ	2.0321
算出周率	算出周率	0.98
波高	算出周率	2.525

波高の頻度分布

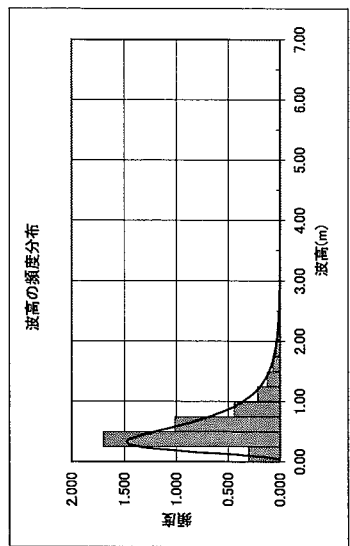


出典：能研技研資料No.744

表 1-17 油 漆 · 周 期 別 度 數 分 布

周間稼 取高稼級	稼級別出現度數										出現率 (%)	累積度數	累積率 (%)					
	0.0~ 3.0	3.0~ 4.0	4.0~ 5.0	5.0~ 6.0	6.0~ 7.0	7.0~ 8.0	8.0~ 9.0	9.0~ 10.0	10.0~ 11.0	11.0~ 12.0								
12.00~														0	0.0	35578	100.0	
11.00~12.00															0	0.0	35578	100.0
10.00~11.00													1		1	0.0	35578	100.0
9.00~10.00													1		1	0.0	35577	100.0
8.00~9.00													1	1	2	0.0	35576	100.0
7.00~8.00													1	1	2	0.0	35574	100.0
6.50~7.00													2	1	3	0.0	35572	100.0
6.00~6.50													3	2	9	0.0	35569	100.0
5.50~6.00													2	9	4	0.0	35560	99.9
5.00~5.50								2					6	9	4	0.1	35545	99.9
4.50~5.00								3	6	8	5	2				0.1	35522	99.8
4.00~4.50						1	6	12	15	9	12	2	1			0.2	35498	99.8
3.50~4.00						6	13	35	39	19	15	7				0.4	35440	99.6
3.00~3.50							46	92	81	59	37	18	8			1.0	35306	99.2
2.50~3.00						26	169	169	143	96	52	27	7	1		2.0	34965	98.3
2.00~2.50				12	130	417	426	251	167	86	29	11	1			4.5	34255	96.3
1.75~2.00				26	218	401	337	223	118	49	16	5				3.9	32665	91.8
1.50~1.75			3	71	470	648	428	244	91	57	19	3				5.7	31267	87.9
1.25~1.50			3	262	828	1065	649	384	159	67	15	2				9.7	29233	82.2
1.00~1.25			17	408	1283	1542	969	431	192	89	24	2	1			13.9	25799	72.5
0.75~1.00				70	757	1902	2012	1413	580	202	83	22	1	1		19.8	20841	58.6
0.50~0.75		5	145	1168	2625	2648	1749	708	182	63	10	1				26.2	13798	38.8
0.25~0.50		11	132	796	1382	1081	750	263	43	11	1					12.6	4494	12.6
0.00~0.25				6	6	7	4	1								0.1	24	0.1
出現度數	0	16	370	3506	8920	10043	7028	3379	1382	650	224	54	5	1	0	0	35576	
出現率 (%)	0.0	0.0	1.0	9.9	25.1	28.2	19.8	9.5	3.9	1.8	0.6	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
累積度數	0	16	386	3892	12812	22955	29883	33262	34644	35294	35518	35572	35577	35578	35578	35578	35578	
累積率 (%)	0.0	0.0	1.1	10.9	36.0	64.2	84.0	93.5	97.4	98.2	98.8	99.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	

出典：港灣技術資料No744



波高	平均值	1.0602	m
	标准偏差	0.465	
	λ	0.56489	
周期	平均值	7.63809	s
	标准偏差	1.44	
	λ	0.19699	
算出波率		2.01568	m
波高		2.850	

表-18 志布志 波高・周期別度数分布

周知階級 波高階級	(階級別出現度数)																累積度数	累積率 (%)			
	0.0~ 3.0	3.0~ 4.0	4.0~ 5.0	5.0~ 6.0	6.0~ 7.0	7.0~ 8.0	8.0~ 9.0	9.0~ 10.0	10.0~ 11.0	11.0~ 12.0	12.0~ 13.0	13.0~ 14.0	14.0~ 15.0	15.0~ 16.0	16.0~ 17.0	17.0~ 18.0			18.0~ 19.0	19.0~	
12.00~																		0	0.0	39867	100.0
11.00~12.00																		0	0.0	39867	100.0
10.00~11.00																		0	0.0	39867	100.0
9.00~10.00																		0	0.0	39867	100.0
8.00~9.00																		0	0.0	39867	100.0
7.00~8.00											1	2	3					0	0.0	39867	100.0
6.50~7.00											2	2						6	0.0	39867	100.0
6.00~6.50											1	3						4	0.0	39861	100.0
5.50~6.00																		4	0.0	39857	100.0
5.00~5.50										1	6	2	1					7	0.0	39853	100.0
4.50~5.00									1	6	2	1						2	0.0	39846	99.9
4.00~4.50									1	4	7	1	1					10	0.0	39844	99.9
3.50~4.00						2	6	2	2	10	7	5	2					36	0.1	39820	99.9
3.00~3.50						3	16	14	13	25	14	15	5					105	0.3	39784	99.8
2.50~3.00						6	26	45	41	20	28	12	1	1				200	0.5	39679	99.5
2.00~2.50				1	37	90	70	49	42	63	35	24	8	3				422	1.1	39479	99.0
1.75~2.00				8	70	76	53	42	58	40	35	13	4	2				401	1.0	39057	98.0
1.50~1.75		2	43	139	176	95	62	66	66	50	37	20	6	1				697	1.7	38656	97.0
1.25~1.50		5	120	299	298	169	147	103	52	33	9	5						1240	3.1	37959	95.2
1.00~1.25	4	63	290	594	488	329	204	108	60	22	5	1						2168	5.4	36719	92.1
0.75~1.00		67	207	686	1179	1084	607	269	177	77	42	10	1					4406	11.1	34551	86.7
0.50~0.75	104	441	613	1696	2727	2498	1333	486	162	61	14	1						10136	25.4	30145	75.6
0.25~0.50	461	1297	1592	2502	4136	4098	2165	551	165	36	5	3	1					16662	42.5	20099	50.2
0.00~0.25	24	191	441	659	880	614	171	46	8	2		1						3047	7.6	3047	7.6
出現度数	589	2000	2863	6005	10077	9453	5059	1923	926	509	295	126	35	7	0	0	0			39867	
出現率 (%)	1.5	5.0	7.2	15.1	25.3	23.7	12.7	4.8	2.3	1.3	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0				
累積度数	589	2589	5452	11457	21543	30987	36046	37969	38895	39404	39699	39825	39860	39867	39867	39867	39867				
累積率 (%)	1.5	6.5	13.7	28.7	54.0	77.7	90.4	95.2	97.6	98.8	99.6	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0				

出典：港湾技術資料No.744

周期代表値 1.5 3.5 4.5 5.5 6.5 7.5 8.5 9.5 10.5 11.5 12.5 13.5 14.5 15.5 16.5 17.5 18.5 19.5
代表値×頻度 883.5 7000 12883.5 33027.5 65500.5 70897.5 83001.5 88268.5 9723 5533.5 3687.5 0 0 0 0 0 0 0

波高	平均値	0.6337
	標準偏差	0.47
周期	平均値	-0.5702
	標準偏差	6.84866 s
	平均値	1.81
	標準偏差	0.25933
	算出確率	1.85033
波高	算出確率	1.900

波高の頻度分布

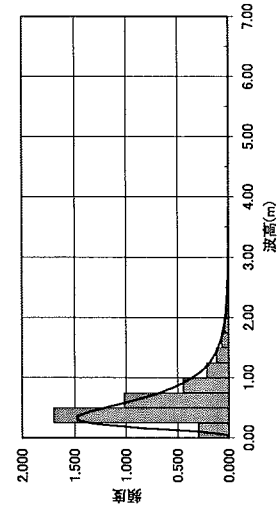


表-19 伊予島 波高・周期別度数分布

周期階級 波高階級	0.0~ 3.0	3.0~ 4.0	4.0~ 5.0	5.0~ 6.0	6.0~ 7.0	7.0~ 8.0	8.0~ 9.0	9.0~ 10.0	10.0~ 11.0	11.0~ 12.0	12.0~ 13.0	13.0~ 14.0	14.0~ 15.0	15.0~ 16.0	16.0~ 17.0	17.0~ 18.0	18.0~ 19.0	19.0~	出現度数	出現率 (%)	累積度数	累積率 (%)	
	(階級別出現度数)																			0	0.0	22886	100.0
12.00~																				0	0.0	22886 <td>100.0</td>	100.0
11.00~12.00																				0	0.0	22886 <td>100.0</td>	100.0
10.00~11.00																				0	0.0	22886 <td>100.0</td>	100.0
9.00~10.00																				0	0.0	22886 <td>100.0</td>	100.0
8.00~9.00																				0	0.0	22886 <td>100.0</td>	100.0
7.00~8.00																				0	0.0	22886 <td>100.0</td>	100.0
6.50~7.00										1	1	1							3	0.0	22886 <td>100.0</td>	100.0	
6.00~6.50									1	1									2	0.0	22883 <td>100.0</td>	100.0	
5.50~6.00									1	1	1								3	0.0	22881 <td>100.0</td>	100.0	
5.00~5.50								1	1	1	1								3	0.0	22878 <td>100.0</td>	100.0	
4.50~5.00								1	2	5	1								9	0.0	22875 <td>100.0</td>	100.0	
4.00~4.50				3			1	3	1	3	2								13	0.1	22866 <td>99.9</td>	99.9	
3.50~4.00				2			1	1	1	1	1	1							7	0.0	22853 <td>99.9</td>	99.9	
3.00~3.50			1			1	3	3	2		3								13	0.1	22846 <td>99.8</td>	99.8	
2.50~3.00			4	2	23	21	6	2		3									61	0.3	22833 <td>99.8</td>	99.8	
2.00~2.50			10	63	58	45	12	5	4	3	1								201	0.9	22772 <td>99.5</td>	99.5	
1.75~2.00			8	150	86	63	14	5	2	1	1								330	1.4	22571 <td>98.6</td>	98.6	
1.50~1.75	1	47	231	134	91	26	2	6	2	1	2								543	2.4	22241 <td>97.2</td>	97.2	
1.25~1.50	1	305	315	216	134	22	10	6	1	1	2								1013	4.4	21698 <td>94.8</td>	94.8	
1.00~1.25	5	654	364	314	136	47	15	3	7	1	1								1547	6.8	20885 <td>90.4</td>	90.4	
0.75~1.00	181	902	635	449	153	52	16	11	8	5	1								2413	10.5	19138 <td>83.6</td>	83.6	
0.50~0.75	3	833	1190	964	617	184	69	44	17	10	5	2							3538	17.2	16725 <td>73.1</td>	73.1	
0.25~0.50	18	2330	3346	2094	851	266	105	37	13	6	1								9057	39.6	12787 <td>55.9</td>	55.9	
0.00~0.25	6	1136	1752	556	153	68	27	18	2	1	1								3720	16.3	3720 <td>16.3</td>	16.3	
出現度数	27	4487	8219	5379	2902	1164	385	160	74	54	25	10	0	0	0	0	0	0	22886				
出現率 (%)	0.1	19.6	36.9	23.5	12.7	5.1	1.7	0.7	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
累積度数	27	4514	12733	18112	21014	22178	22563	22723	22797	22851	22876	22886	22886	22886	22886	22886	22886	22886					
累積率 (%)	0.1	19.7	55.6	79.1	91.8	96.9	98.6	99.3	99.6	99.8	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0					

出典：港湾技術資料No744

周期代表値 1.5 3.5 4.5 5.5 6.5 7.5 8.5 9.5 10.5 11.5 12.5 13.5 14.5 15.5 16.5 17.5 18.5 19
 代表値×頻度 40.5 15704.5 36985.5 29884.5 18863 8730 3272.5 1520 777 621 312.5 135 0 0 0 0 0 0 0

波高	平均値 標準偏差 λ	0.6042 0.37 0.8408
周期	平均値 標準偏差 λ	5.09246s 1.32 0.255
平均波速	λ	1.5952s
波速比 _{0.5}		1.875m

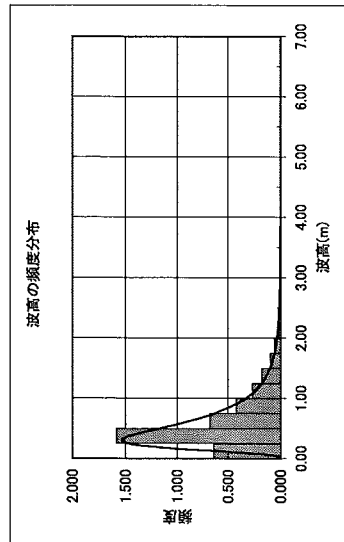


表-20 釧路 波高・周期別数分布

波高階級 波高階級 12 12.00~	0.0~ 3.0~ 4.0	5.0~ 5.0 6.0	7.0~ 8.0 9.0	10.0~ 10.0 11.0	11.0~ 12.0 13.0	13.0~ 14.0 15.0	14.0~ 15.0 16.0	15.0~ 16.0 17.0	16.0~ 17.0 18.0	17.0~ 18.0 19.0	18.0~ 19.0 20.0	出現回数	出現率 (%)	累積回数	累積率 (%)
11.5 11.00~12.00												0	0.0	59225	100.0
10.5 10.00~11.00												0	0.0	59225	100.0
9.5 9.00~10.00												0	0.0	59225	100.0
8.5 8.00~9.00												0	0.0	59225	100.0
7.5 7.00~8.00												0	0.0	59225	100.0
6.5 6.50~7.00												0	0.0	59225	100.0
6.25 6.00~6.50												0	0.0	59225	100.0
5.75 5.50~6.00					1							2	0.0	59225	100.0
5.25 5.00~5.50												0	0.0	59223	100.0
4.75 4.50~5.00												1	0.0	59223	100.0
4.25 4.00~4.50												3	0.0	59222	100.0
3.75 3.50~4.00												10	0.0	59219	100.0
3.25 3.00~3.50												37	0.1	59209	100.0
2.75 2.50~3.00												219	0.4	59172	99.9
2.25 2.00~2.50												888	1.5	58953	99.5
1.875 1.75~2.00												973	1.6	58985	98.1
1.625 1.50~1.75												1632	2.8	57112	96.4
1.375 1.25~1.50												2479	4.2	55460	93.6
1.125 1.00~1.25												3866	6.5	52981	89.5
0.875 0.75~1.00												6611	11.2	49115	82.9
0.625 0.50~0.75												10759	18.2	42504	71.8
0.375 0.25~0.50												20541	34.7	31745	53.6
0.125 0.00~0.25												11204	18.9	11204	18.9
出現回数	5795	16120	16418	12407	6162	1873	368	75	4	2	1	0	0	59225	
出現率 (%)	9.8	27.2	27.7	20.9	10.4	3.2	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	59225	
累積回数	5795	21915	38333	50740	56902	58775	59143	59218	59224	59224	59224	59225	59225	59225	
累積率 (%)	9.8	37.0	64.7	85.7	96.1	99.2	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	

出典：港湾技術研究所No744

周期代表値 1.5 3.5 4.5 5.5 6.5 7.5 8.5 9.5 10.5 11.5 12.5 13.5 14.5 15.5 16.5 17.5 18.5 19
代表値×頻度 8952.5 56420 73881 68238.5 40553 14047.5 3128 712.5 42 11.5 12.5 12.5 13.5 14.5 15.5 16.5 17.5 18.5 19

波高	平均値	0.61534m
	標準偏差	0.47
周期	平均値	0.7087
	標準偏差	4.47559s
	平均値	1.27
	標準偏差	0.2781
	平均値	1.45055
	標準偏差	0.98
	平均値	1.875m

波高の頻度分布

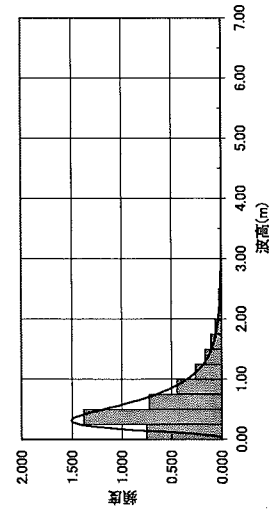
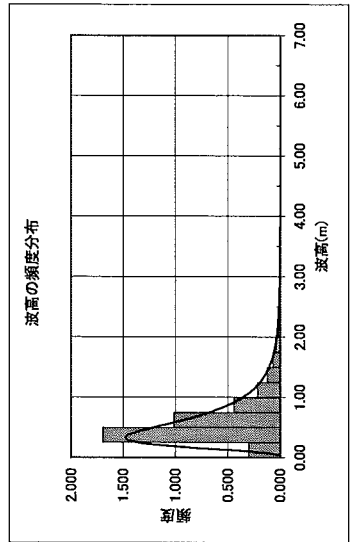


表-21 女界灘 波高・周期別度数分布

周期階級 波高階級	(階級別出現度数)																出現率 (%)	累積度数	累積率 (%)		
	0.0~ 3.0	3.0~ 4.0	4.0~ 5.0	5.0~ 6.0	6.0~ 7.0	7.0~ 8.0	8.0~ 9.0	9.0~ 10.0	10.0~ 11.0	11.0~ 12.0	12.0~ 13.0	13.0~ 14.0	14.0~ 15.0	15.0~ 16.0	16.0~ 17.0	17.0~ 18.0				18.0~ 19.0	
12.00~																		0	0.0	20379	100.0
11.00~12.00																		0	0.0	20379	100.0
10.00~11.00																		0	0.0	20379	100.0
9.00~10.00																		0	0.0	20379	100.0
8.00~9.00																		0	0.0	20379	100.0
7.00~8.00											1	1						0	0.0	20379	100.0
6.50~7.00																		0	0.0	20377	100.0
6.00~6.50									1	1								2	0.0	20377	100.0
5.50~6.00								1	3									4	0.0	20375	100.0
5.00~5.50								9	2									11	0.1	20371	100.0
4.50~5.00								2	8	2	1							13	0.1	20360	99.9
4.00~4.50								11	9	2	1							23	0.1	20347	99.8
3.50~4.00							8	27	3	2	2							42	0.2	20324	99.7
3.00~3.50						13	44	30	15	1								103	0.5	20282	99.5
2.50~3.00				2	102	129	43	31	6	3		1						317	1.6	20179	99.0
2.00~2.50				89	444	240	89	31	6	7	5							911	4.5	19862	97.5
1.75~2.00			1	189	334	166	71	26	9	5								801	3.9	18951	93.0
1.50~1.75			23	353	412	187	94	46	21	2		1						1139	5.6	18150	89.1
1.25~1.50		2	98	598	506	274	127	51	19	1			1					1677	8.2	17011	83.5
1.00~1.25		12	374	752	580	302	147	50	10									2237	11.0	15334	75.2
0.75~1.00		100	810	945	542	299	103	35	8									2842	13.9	13097	64.3
0.50~0.75		512	1310	991	530	234	57	14	2									3650	17.9	10255	50.3
0.25~0.50	58	1554	1836	1108	403	97	13	3	1									5093	25.0	6605	32.4
0.00~0.25	57	950	350	95	41	6	3											1512	7.4	1512	7.4
出現度数	125	3150	4802	5132	3807	1986	817	332	95	23	6	3	1	0	0	0	0	20379			
出現率 (%)	0.6	15.5	23.6	25.2	19.2	9.7	4.0	1.6	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
累積度数	125	3275	8077	13209	17116	19102	19919	20251	20346	20369	20375	20378	20379	20379	20379	20379	20379				
累積率 (%)	0.6	16.1	39.6	64.8	84.0	93.7	97.7	99.4	99.8	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0				

周期代表値 1.5 3.5 4.5 5.5 6.5 7.5 8.5 9.5 10.5 11.5 12.5 13.5 14.5 15.5 16.5 17.5 18.5 19
代表値×頻度 187.5 11025 21609 28226 25395.5 14885 6944.5 3154 997.5 264.5 75 40.5 14.5 0 0 0 0 0

波高	平均値	0.9187
	標準偏差	0.435
	$\sum$	0.63703
	λ	-0.2876
周期	平均値	5.5385
	標準偏差	0.2613
	$\sum$	1.6763
	λ	0.98
算出確率		0.98
波高		2.725



出典：港湾技術資料No.744

表-22 中城河 波高・周期別度数分布

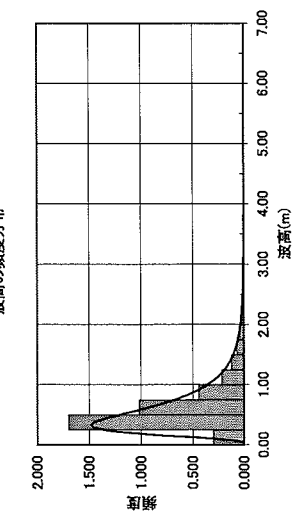
周期階級 波高階級	(階級別出現度数)																			累積度数 (%)	累積率 (%)	
	0.0~ 3.0	3.0~ 4.0	4.0~ 5.0	5.0~ 6.0	6.0~ 7.0	7.0~ 8.0	8.0~ 9.0	9.0~ 10.0	10.0~ 11.0	11.0~ 12.0	12.0~ 13.0	13.0~ 14.0	14.0~ 15.0	15.0~ 16.0	16.0~ 17.0	17.0~ 18.0	18.0~ 19.0	19.0~ 20.0				
12.00~																			0	0.0	60154	100.0
11.00~12.00																			0	0.0	60154	100.0
10.00~11.00																			0	0.0	60154	100.0
9.00~10.00																			0	0.0	60154	100.0
8.00~9.00											1	1							3	0.0	60154	100.0
7.00~8.00										3	3	3	1						10	0.0	60151	100.0
6.50~7.00									6	7	1	2							16	0.0	60141	100.0
6.00~6.50								1	17	6	3	1							28	0.0	60125	100.0
5.50~6.00								3	6	6	5	4	1						25	0.0	60097	99.9
5.00~5.50							2	10	15	17	15	5		1					65	0.1	60072	99.9
4.50~5.00							2	19	21	22	10	4	1						79	0.1	60007	99.8
4.00~4.50						1	17	32	27	30	14	9	1						131	0.2	59928	99.6
3.50~4.00						7	40	57	49	20	28	9	4						214	0.4	59797	99.4
3.00~3.50		1	1			1	59	119	104	68	69	47	9	2					480	0.8	59583	99.1
2.50~3.00	1	1	1			36	271	298	201	166	100	39	6						1120	1.9	59103	98.3
2.00~2.50		1	1	15	338	922	656	413	231	119	41	5	3						2745	4.6	57993	96.4
1.75~2.00		1	3	69	572	738	488	274	126	56	15	12							2357	3.9	55238	91.8
1.50~1.75			3	282	1081	1153	676	345	167	64	18	6							3755	6.3	52881	87.9
1.25~1.50			18	731	1902	1689	915	465	175	66	18	3							5982	9.9	49086	81.6
1.00~1.25		3	117	1609	2743	2733	1621	616	164	46	3	2							9657	16.1	43104	71.7
0.75~1.00	1	9	395	2301	4186	4104	2471	789	163	34	3	1							14457	24.0	33447	55.6
0.50~0.75	3	29	570	2498	4345	4377	2167	647	108	28	4								14776	24.6	18990	31.6
0.25~0.50		24	278	744	1258	1034	634	188	18	2									4180	6.9	4214	7.0
0.00~0.25			2	13	11	5	2	1											34	0.1	34	0.1
出現度数	5	69	1389	8262	16473	17093	10108	4165	1527	696	271	81	14	1	0	0	0	0	60154			
出現率 (%)	0.0	0.1	2.3	13.7	27.4	28.4	16.8	6.9	2.5	1.2	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
累積度数	5	74	1463	9725	26198	43291	53399	57564	59091	59787	60058	60139	60153	60154	60154	60154	60154	60154				
累積率 (%)	0.0	0.1	2.4	16.2	43.6	72.0	88.8	95.7	96.2	96.4	96.8	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0				

出典：港研技術資料6744

波高	1.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	19
代表値×頻度	7.5	241.5	6250.5	4544	10707.5	128198	85918	39567.5	16033.5	8004	3387.5	1093.5	203	15.5	0	0	0	0

波高	平均値	1.10635	m
	標準偏差	0.64	
	λ	0.53727	
周期	λ	-0.0433	
	平均値	7.33841	s
	標準偏差	1.41	
	λ	0.1904	
	λ	1.975	
算出確率	λ	0.98	
波高	算出確率	2.850	m

波高の頻度分布



【巻末資料3】観測波高による極地統計解析

本研究で開発した極地統計解析プログラムを用いて、観測波高による極値統計解析を実施した。
対象とした観測地は、「4章浮体橋の適用性の検討」で適用性が認められた7地点の内、最大波高が記録されている年数が比較的多い4地点（浜金谷、神戸、志布志、藍島）とした。
なお、ここで使用している波高データは、台風や高波にかかわらず、各年の最大波高である。

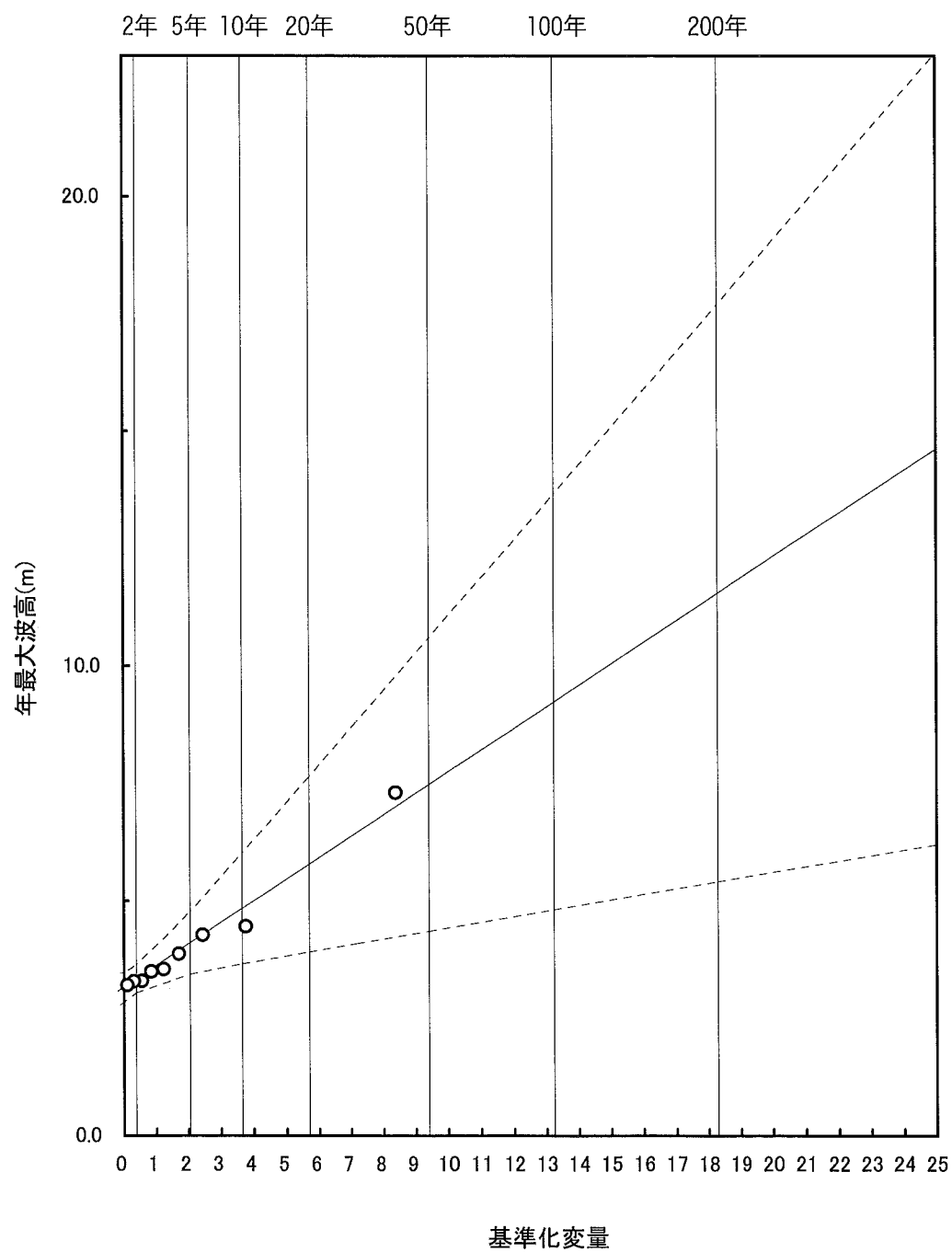
	浜金谷		神戸		志布志		藍島	
	年	波高(m)	年	波高(m)	年	波高(m)	年	波高(m)
1	74	3.87	72	2.07	80	7.39	78	2.81
2	75	3.29	75	2.35	81	3.73	80	4.23
3	77	3.20	77	2.39	82	7.88	81	3.51
4	79	4.45	78	2.66	83	3.65	82	3.53
5	80	3.15	79	2.00	84	3.54	83	3.67
6	81	3.19	80	2.40	85	4.70	84	3.20
7	82	4.27	81	2.32	86	4.59	85	3.03
8	83	3.28	82	1.87	87	3.86	86	3.33
9	85	7.30	83	2.66	89	4.28	87	5.61
10	86	3.09	84	2.57			88	3.77
11	87	3.54	85	2.08			89	2.83
12	88	3.49	87	2.14				
13	89	2.99	90	2.23				
14	91	2.96						

表中の有義波データは、港湾技研資料第744号（平成5年）の高波一覧表から取得

次ページ以降には、ワイブル分布関数（変数 $k=0.75、1.00、1.40、2.00$ の4種類）、極値Ⅱ型分布関数（変数 $k=2.50、3.33、5.00、10.00$ の4種類）、極値Ⅰ型分布関数の計9種類の分布関数を使った波高の極値統計解析結果の表を示す。また、グラフには、観測波高に対する近似の精度を表す相関係数 γ が1.0に最も近い分布関数を使った場合の解析結果を示す。例えば、浜金谷の場合、 $k=2.50$ の極値Ⅱ型分布関数が最も良く観測波高を近似しており、再現期間100年の確率波高は9.23mとなる。

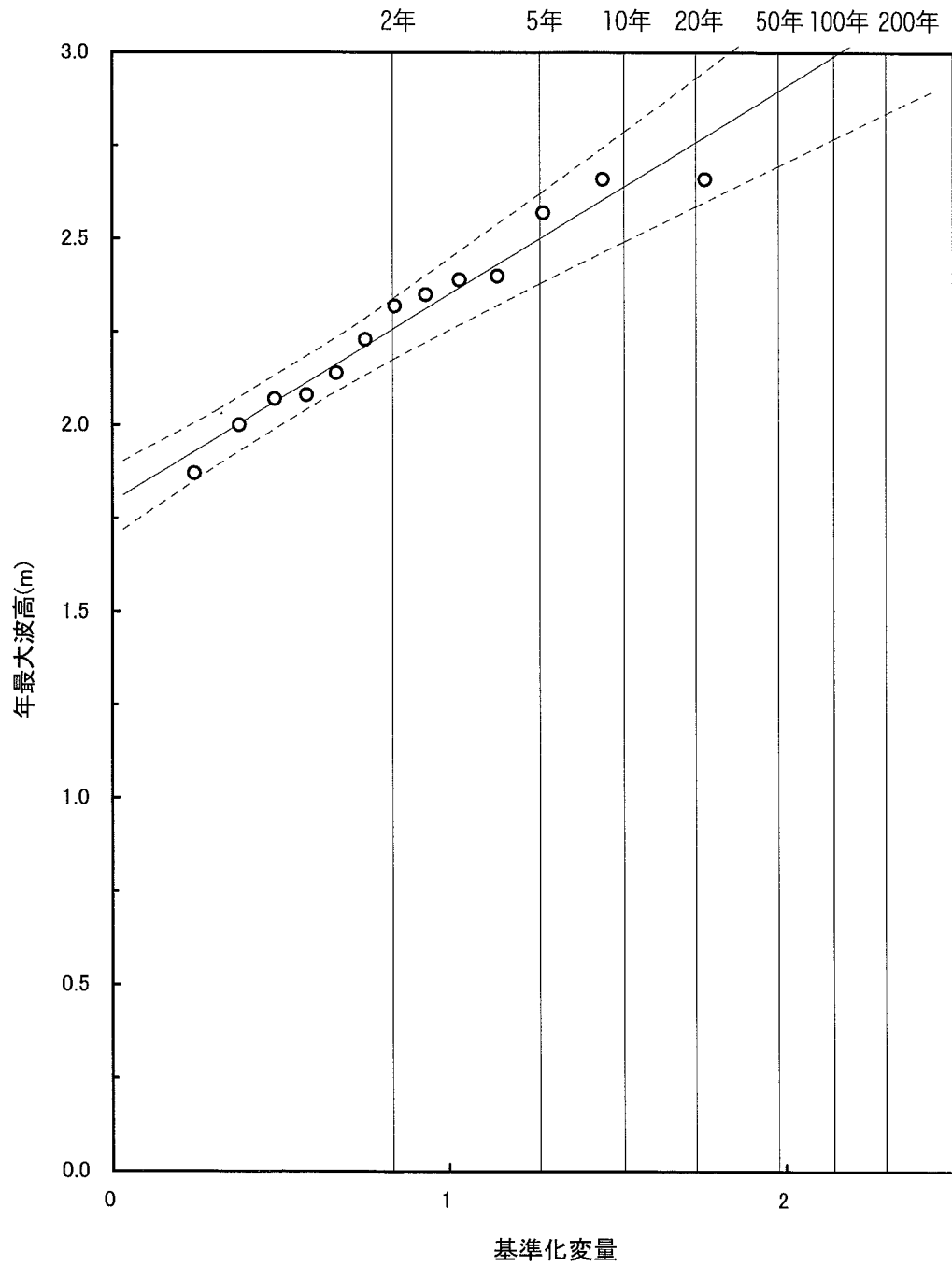
【波高の極値統計解析】										統計期間：74年～91年				地点名		浜金谷		
順位	波高(m)	発生年	ワイブール k=0.75		ワイブール k=1.00		ワイブール k=1.40		ワイブール k=2.00		極値Ⅱ型 k=2.50		極値Ⅱ型 k=3.33		極値Ⅱ型 k=5.00		極値Ⅱ型 k=10.00	
			Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)
1	7.30	85	0.9662	5.0900	0.9633	3.3042	0.9603	2.3084	0.9576	1.7778	0.9750	8.3773	0.9713	6.3038	0.9677	4.8988	0.9640	3.9178
2	4.45	79	0.8971	2.9907	0.8940	2.2440	0.8908	1.7646	0.8880	1.4795	0.9039	3.7552	0.9003	3.2225	0.8967	2.7889	0.8931	2.4359
3	4.27	82	0.8280	2.1253	0.8247	1.7411	0.8213	1.4745	0.8183	1.3060	0.8329	2.4331	0.8294	2.1786	0.8258	1.9595	0.8222	1.7716
4	3.87	74	0.7589	1.5996	0.7554	1.4080	0.7519	1.2676	0.7487	1.1752	0.7619	1.7084	0.7584	1.5685	0.7549	1.4441	0.7514	1.3340
5	3.54	87	0.6897	1.2333	0.6861	1.1586	0.6824	1.1029	0.6791	1.0681	0.6908	1.2215	0.6874	1.1411	0.6839	1.0679	0.6805	1.0017
6	3.49	88	0.6206	0.9591	0.6168	0.9591	0.6129	0.9634	0.6095	0.9697	0.6198	0.8576	0.6164	0.8111	0.6130	0.7682	0.6096	0.6922
7	3.29	75	0.5515	0.7449	0.5475	0.7929	0.5434	0.8405	0.5398	0.8810	0.5487	0.5665	0.5454	0.5401	0.5421	0.5153	0.5387	0.4921
8	3.28	83	0.4823	0.5728	0.4782	0.6504	0.4740	0.7290	0.4702	0.7970	0.4777	0.3218	0.4744	0.3068	0.4711	0.2924	0.4679	0.2788
9	3.20	77	0.4132	0.4323	0.4089	0.5257	0.4045	0.6254	0.4006	0.7154	0.4066	0.1078	0.4034	0.0982	0.4002	0.0887	0.3970	0.0795
10	3.19	81	0.3441	0.3163	0.3396	0.4149	0.3350	0.5271	0.3310	0.6340	0.3356	-0.0863	0.3324	-0.0951	0.3293	-0.1041	0.3261	-0.1132
11	3.15	80	0.2750	0.2203	0.2703	0.3151	0.2656	0.4318	0.2613	0.5504	0.2646	-0.2693	0.2615	-0.2812	0.2583	-0.2937	0.2552	-0.3068
12	3.09	86	0.2058	0.1413	0.2010	0.2244	0.1961	0.3372	0.1917	0.4613	0.1935	-0.4500	0.1905	-0.4692	0.1874	-0.4898	0.1844	-0.5117
13	2.99	89	0.1367	0.0776	0.1317	0.1412	0.1266	0.2397	0.1221	0.3609	0.1225	-0.6419	0.1195	-0.6744	0.1165	-0.7098	0.1135	-0.7481
14	2.96	91	0.0676	0.0288	0.0624	0.0644	0.0571	0.1322	0.0525	0.2321	0.0514	-0.8820	0.0485	-0.9421	0.0455	-1.0097	0.0426	-1.0857
プロバティグ・ボジション係数			α'	0.5118	α'	0.4700	α'	0.4282	α'	0.3909	α'	0.6480	α'	0.5962	α'	0.5440	α'	0.4920
			β	0.4656	β	0.4300	β	0.3944	β	0.3626	β	0.0760	β	0.0870	β	0.0980	β	0.1090
母数推定値			A	0.7713	A	1.1460	A	1.6087	A	2.1429	A	0.4585	A	0.5691	A	0.6713	A	0.7571
			B	2.8084	B	2.5779	B	2.2549	B	1.8203	B	3.1619	B	3.1620	B	3.1815	B	3.2177
相関係数			γ	0.9693	γ	0.9357	γ	0.8893	γ	0.8409	γ	0.9869	γ	0.9692	γ	0.9439	γ	0.9130
データ数： (N) 確率 平均値： ($\bar{x}$) 標準偏差 (σ_x)	14 3.72 1.13	1年	2.81	2.58	1年	2.25	1年	2.25	1年	1.82	1年	2.37	1年	2.06	1年	1.70	1年	1.30
		2年	3.28	3.37	2年	3.49	2年	3.49	2年	3.60	2年	3.34	2年	3.38	2年	3.44	2年	3.50
		5年	4.26	4.42	5年	4.51	5年	4.51	5年	4.54	5年	4.10	5年	4.24	5年	4.36	5年	4.44
		10年	5.15	5.22	10年	5.17	10年	5.17	10年	5.07	10年	4.84	10年	4.99	10年	5.09	10年	5.13
		20年	6.14	6.01	20年	5.78	20年	5.78	20年	5.53	20年	5.78	20年	5.89	20年	5.90	20年	5.84
標準偏差		1.13	6.75	6.48	30年	6.11	30年	5.77	30年	6.45	30年	6.50	30年	6.50	30年	6.43	30年	6.27
(σ_x)		(m)	7.56	7.06	50年	6.52	50年	6.06	50年	7.47	50年	7.38	50年	7.15	50年	7.64	50年	7.05
			8.72	7.86	100年	7.04	100年	6.42	100年	9.23	100年	8.81	100年	8.25	100年	7.64	100年	7.05
			9.93	8.65	200年	7.55	200年	6.75	200年	11.55	200年	10.56	200年	9.50	200年	8.50	200年	7.62

浜金谷 14年統計 極値Ⅱ型(k=2.50)



【波高の極値統計解析】										地点名		神戸								
統計期間：72年～90年										極値Ⅱ型 k=10.00										
順位	波高(m)	発生年	ワイブル k=0.75		ワイブル k=1.00		ワイブル k=1.40		ワイブル k=2.00		極値Ⅱ型 k=2.50		極値Ⅱ型 k=3.33		極値Ⅱ型 k=5.00		極値Ⅱ型 k=10.00			
			Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)		
1	2.66	78	0.9637	4.9470	0.9605	3.2324	0.9573	2.2715	0.9544	1.7573	0.9731	8.0572	0.9691	6.0899	0.9652	4.7518	0.9612	3.8139	0.9573	3.1322
2	2.66	83	0.8895	2.8657	0.8861	2.1722	0.8827	1.7234	0.8796	1.4549	0.8966	3.5638	0.8927	3.0712	0.8888	2.6685	0.8850	2.3393	0.8811	2.0668
3	2.57	84	0.8152	2.0107	0.8116	1.6693	0.8080	1.4302	0.8047	1.2781	0.8201	2.2755	0.8163	2.0457	0.8125	1.8470	0.8087	1.6760	0.8049	1.5276
4	2.40	80	0.7410	1.4931	0.7372	1.3362	0.7333	1.2205	0.7299	1.1441	0.7437	1.5674	0.7399	1.4445	0.7361	1.3348	0.7324	1.2373	0.7287	1.1503
5	2.39	77	0.6667	1.1337	0.6627	1.0868	0.6587	1.0530	0.6551	1.0317	0.6672	1.0899	0.6635	1.0216	0.6598	0.9592	0.6561	0.9026	0.6524	0.8509
6	2.35	75	0.5924	0.8658	0.5882	0.8873	0.5840	0.9106	0.5802	0.9317	0.5907	0.7315	0.5871	0.6935	0.5834	0.6583	0.5798	0.6257	0.5762	0.5955
7	2.32	81	0.5182	0.6575	0.5138	0.7211	0.5094	0.7846	0.5054	0.8391	0.5142	0.4430	0.5107	0.4221	0.5071	0.4024	0.5035	0.3840	0.5000	0.3665
8	2.23	90	0.4439	0.4913	0.4393	0.5786	0.4347	0.6696	0.4306	0.7504	0.4377	0.1985	0.4343	0.1864	0.4308	0.1747	0.4273	0.1634	0.4238	0.1525
9	2.14	87	0.3696	0.3566	0.3649	0.4539	0.3600	0.5620	0.3557	0.6631	0.3613	-0.0179	0.3578	-0.0272	0.3544	-0.0365	0.3510	-0.0458	0.3476	-0.0553
10	2.08	85	0.2954	0.2467	0.2904	0.3430	0.2854	0.4589	0.2809	0.5742	0.2848	-0.2178	0.2814	-0.2291	0.2781	-0.2408	0.2747	-0.2530	0.2713	-0.2657
11	2.07	72	0.2211	0.1574	0.2159	0.2433	0.2107	0.3572	0.2061	0.4804	0.2083	-0.4120	0.2050	-0.4300	0.2017	-0.4491	0.1984	-0.4694	0.1951	-0.4911
12	2.00	79	0.1468	0.0860	0.1415	0.1525	0.1361	0.2533	0.1312	0.3751	0.1318	-0.6152	0.1286	-0.6461	0.1254	-0.6798	0.1221	-0.7163	0.1189	-0.7559
13	1.87	82	0.0726	0.0318	0.0670	0.0694	0.0614	0.1394	0.0564	0.2409	0.0554	-0.8656	0.0522	-0.9243	0.0490	-0.9905	0.0458	-1.0647	0.0427	-1.1487
プロパティ・ホジソン係数			α'	0.5118	α'	0.4700	α'	0.4282	α'	0.3909	α'	0.6480	α'	0.5962	α'	0.5440	α'	0.4920	α'	0.4400
			β	0.4656	β	0.4300	β	0.3944	β	0.3626	β	0.0760	β	0.0870	β	0.0980	β	0.1090	β	0.1200
母数推定値			A	0.1527	A	0.2506	A	0.3870	A	0.5576	A	0.0862	A	0.1151	A	0.1455	A	0.1750	A	0.2021
			B	2.1075	B	2.0382	B	1.9354	B	1.7936	B	2.1829	B	2.1751	B	2.1713	B	2.1720	B	2.1769
相関係数			γ	0.8553	γ	0.9138	γ	0.9566	γ	0.9789	γ	0.8250	γ	0.8731	γ	0.9126	γ	0.9430	γ	0.9648
データ数: (N) 平均値: ($\bar{x}$) 標準偏差 (σ_x)	13 229 0.25 (m)	確率 波高 (m)	1年	2.11	1年	2.04	1年	1.94	1年	1.79	1年	2.03	1年	1.95	1年	1.85	1年	1.73	1年	1.59
			2年	2.20	2年	2.21	2年	2.23	2年	2.26	2年	2.22	2年	2.22	2年	2.23	2年	2.24	2年	2.25
			5年	2.40	5年	2.44	5年	2.48	5年	2.50	5年	2.36	5年	2.39	5年	2.43	5年	2.46	5年	2.48
			10年	2.57	10年	2.62	10年	2.64	10年	2.64	10年	2.50	10年	2.55	10年	2.58	10年	2.61	10年	2.63
			20年	2.77	20年	2.79	20年	2.78	20年	2.76	20年	2.67	20年	2.73	20年	2.76	20年	2.78	20年	2.78
			30年	2.89	30年	2.89	30年	2.86	30年	2.82	30年	2.80	30年	2.85	30年	2.88	30年	2.88	30年	2.86
			50年	3.05	50年	3.02	50年	2.96	50年	2.90	50年	2.99	50年	3.03	50年	3.03	50年	3.01	50年	2.97
			100年	3.28	100年	3.19	100年	3.09	100年	2.99	100年	3.32	100年	3.32	100年	3.27	100年	3.19	100年	3.11
			200年	3.52	200年	3.37	200年	3.21	200年	3.08	200年	3.76	200年	3.67	200年	3.54	200年	3.39	200年	3.25

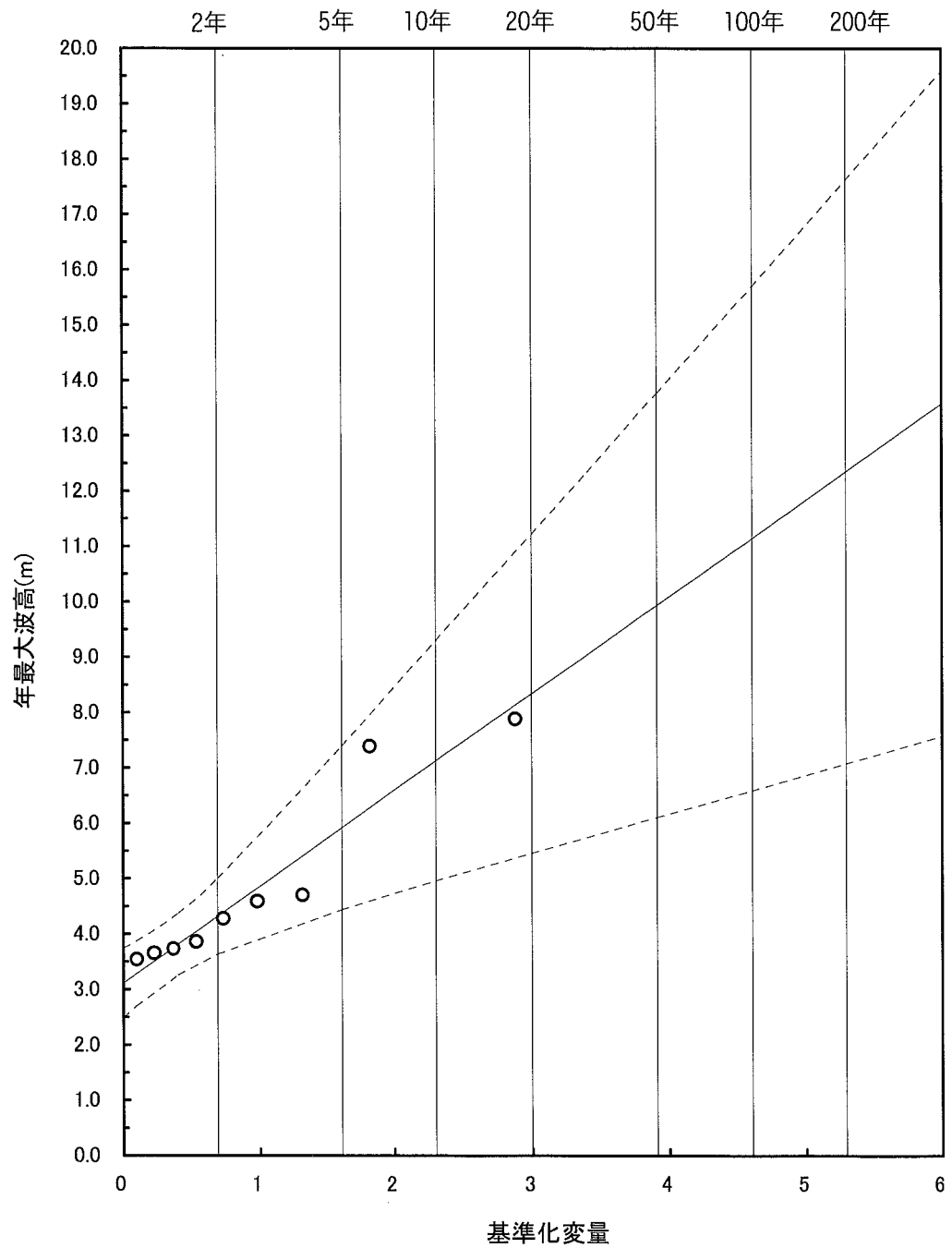
神戸 13年統計 ワイブル(k=2.00)



相関係数: $\gamma = 0.9789$

【波高の極値統計解析】										統計期間：80年～89年				地点名		志布志				
順位	波高(m)	発生年	ワイブル k=0.75		ワイブル k=1.00		ワイブル k=1.40		ワイブル k=2.00		極値Ⅱ型 k=2.50		極値Ⅱ型 k=3.33		極値Ⅱ型 k=5.00		極値Ⅱ型 k=10.00		極値Ⅰ型	
			Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)
1	7.88	82	0.9484	4.2589	0.9438	2.8788	0.9391	2.0859	0.9349	1.6530	0.9612	6.6003	0.9556	5.0948	0.9499	4.0520	0.9442	3.3082	0.9386	2.7588
2	7.39	80	0.8428	2.2712	0.8378	1.8186	0.8327	1.5144	0.8281	1.3271	0.8510	2.6866	0.8455	2.3615	0.8400	2.0903	0.8344	1.8641	0.8289	1.6735
3	4.70	85	0.7371	1.4716	0.7317	1.3157	0.7262	1.2031	0.7213	1.1304	0.7409	1.5469	0.7355	1.4162	0.7301	1.3010	0.7247	1.1998	0.7193	1.1102
4	4.59	86	0.6315	0.9977	0.6257	0.9826	0.6198	0.9763	0.6145	0.9764	0.6307	0.9078	0.6254	0.8492	0.6201	0.7959	0.6149	0.7475	0.6096	0.7035
5	4.28	89	0.5258	0.6768	0.5196	0.7332	0.5133	0.7910	0.5077	0.8418	0.5205	0.4647	0.5154	0.4376	0.5102	0.4123	0.5051	0.3886	0.5000	0.3665
6	3.86	87	0.4202	0.4452	0.4136	0.5337	0.4069	0.6289	0.4009	0.7158	0.4103	0.1183	0.4053	0.1035	0.4003	0.0890	0.3953	0.0749	0.3904	0.0611
7	3.73	81	0.3145	0.2730	0.3075	0.3675	0.3005	0.4795	0.2941	0.5902	0.3001	-0.1786	0.2953	-0.1929	0.2904	-0.2079	0.2855	-0.2233	0.2807	-0.2394
8	3.65	83	0.2089	0.1445	0.2015	0.2250	0.1940	0.3343	0.1873	0.4554	0.1900	-0.4592	0.1852	-0.4835	0.1805	-0.5098	0.1758	-0.5381	0.1711	-0.5686
9	3.54	84	0.1033	0.0521	0.0954	0.1003	0.0876	0.1814	0.0805	0.2897	0.0798	-0.7750	0.0752	-0.8271	0.0706	-0.8858	0.0660	-0.9517	0.0614	-1.0261
プロパティグ・ボジション係数			α'	0.5118	α'	0.4700	α'	0.4282	α'	0.3909	α'	0.6480	α'	0.5962	α'	0.5440	α'	0.4920	α'	0.4400
母数推定値			β	0.4656	β	0.4300	β	0.3944	β	0.3626	β	0.0760	β	0.0870	β	0.0980	β	0.1090	β	0.1200
相関係数			A	1.1428	A	1.7441	A	2.5210	A	3.4480	A	0.6638	A	0.8389	A	1.0091	A	1.1616	A	1.2875
			B	3.5019	B	3.1112	B	2.5512	B	1.7896	B	4.0418	B	4.0302	B	4.0465	B	4.0891	B	4.1544
			γ	0.9479	γ	0.9529	γ	0.9398	γ	0.9152	γ	0.9274	γ	0.9395	γ	0.9430	γ	0.9384	γ	0.9268
データ数： (N) 平均値： ($\bar{x}$) 標準偏差： (σ_x)	9 雄 莖 波 高 4.85 1.64 (m)		1年	3.50	1年	3.11	1年	2.55	1年	1.79	1年	2.90	1年	2.40	1年	1.82	1年	1.15	1年	0.40
			2年	4.20	2年	4.32	2年	4.49	2年	4.66	2年	4.30	2年	4.36	2年	4.43	2年	4.52	2年	4.63
			5年	5.66	5年	5.92	5年	6.09	5年	6.16	5年	5.41	5年	5.62	5年	5.81	5年	5.97	5年	6.09
			10年	6.98	10年	7.13	10年	7.13	10年	7.02	10年	6.46	10年	6.73	10年	6.91	10年	7.02	10年	7.05
			20年	8.44	20年	8.34	20年	8.07	20年	7.76	20年	7.83	20年	8.05	20年	8.14	20年	8.11	20年	7.98
			30年	9.35	30年	9.04	30年	8.59	30年	8.15	30年	8.81	30年	8.95	30年	8.93	30年	8.77	30年	8.51
			50年	10.55	50年	9.93	50年	9.23	50年	8.61	50年	10.29	50年	10.25	50年	10.01	50年	9.63	50年	9.18
			100年	12.26	100年	11.14	100年	10.06	100年	9.19	100年	12.83	100年	12.36	100年	11.66	100年	10.87	100年	10.08
			200年	14.06	200年	12.35	200年	10.85	200年	9.73	200年	16.18	200年	14.94	200年	13.55	200年	12.20	200年	10.97

志布志 9年統計 ワイブル(k=1.00)



相関係数: $\gamma = 0.9529$

【波高の極値統計解析】										統計期間：78年～89年										地点名		藍島	
順位	波高(m)	発生年	ワイブル k=0.75		ワイブル k=1.00		ワイブル k=1.40		ワイブル k=2.00		極値Ⅱ型 k=2.50		極値Ⅱ型 k=3.33		極値Ⅱ型 k=5.00		極値Ⅱ型 k=10.00		極値Ⅰ型				
			Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)	Fm	y(m)					
1	5.61	87	0.9574	4.6299	0.9536	3.0711	0.9498	2.1877	0.9464	1.7106	0.9682	7.3691	0.9636	5.6246	0.9589	4.4278	0.9543	3.5822	0.9496	2.9628			
2	4.23	80	0.8702	2.5902	0.8661	2.0110	0.8621	1.6295	0.8584	1.3981	0.8779	3.1509	0.8734	2.7406	0.8688	2.4020	0.8643	2.1227	0.8597	1.8894			
3	3.77	88	0.7830	1.7596	0.7787	1.5080	0.7743	1.3286	0.7704	1.2130	0.7876	1.9340	0.7832	1.7540	0.7787	1.5968	0.7742	1.4603	0.7698	1.3408			
4	3.67	83	0.6958	1.2610	0.6912	1.1749	0.6965	1.1119	0.6824	1.0709	0.6974	1.2601	0.6930	1.1706	0.6886	1.0898	0.6842	1.0175	0.6799	0.9522			
5	3.53	82	0.6085	0.9181	0.6037	0.9255	0.5988	0.9372	0.5944	0.9499	0.6071	0.8012	0.6028	0.7555	0.5985	0.7133	0.5942	0.6747	0.5899	0.6391			
6	3.51	81	0.5213	0.6654	0.5162	0.7261	0.5110	0.7872	0.5064	0.8402	0.5168	0.4518	0.5126	0.4285	0.5084	0.4065	0.5042	0.3859	0.5000	0.3665			
7	3.33	86	0.4341	0.4719	0.4287	0.5598	0.4232	0.6527	0.4183	0.7361	0.4265	0.1653	0.4224	0.1521	0.4183	0.1393	0.4142	0.1269	0.4101	0.1149			
8	3.20	84	0.3469	0.3206	0.3412	0.4173	0.3355	0.5277	0.3303	0.6332	0.3362	-0.0847	0.3322	-0.0957	0.3282	-0.1070	0.3242	-0.1184	0.3201	-0.1301			
9	3.03	85	0.2597	0.2014	0.2537	0.2927	0.2477	0.4076	0.2423	0.5268	0.2459	-0.3165	0.2420	-0.3321	0.2381	-0.3486	0.2341	-0.3660	0.2302	-0.3844			
10	2.83	89	0.1725	0.1087	0.1662	0.1818	0.1600	0.2871	0.1543	0.4094	0.1557	-0.5496	0.1518	-0.5773	0.1480	-0.6074	0.1441	-0.6398	0.1403	-0.6750			
11	2.81	78	0.0852	0.0398	0.0787	0.0820	0.0722	0.1571	0.0663	0.2620	0.0654	-0.8265	0.0616	-0.8822	0.0578	-0.9449	0.0541	-1.0152	0.0504	-1.0948			
プロバティグ・ホジソン係数			α'	0.5118	α'	0.4700	α'	0.4282	α'	0.3909	α'	0.6480	α'	0.5962	α'	0.5440	α'	0.4920	α'	0.4400			
			β	0.4656	β	0.4300	β	0.3944	β	0.3626	β	0.0760	β	0.0870	β	0.0980	β	0.1090	β	0.1200			
母数推定値			A	0.5627	A	0.8556	A	1.2361	A	1.6938	A	0.3337	A	0.4193	A	0.5021	A	0.5759	A	0.6371			
			B	2.9295	B	2.7410	B	2.4674	B	2.0914	B	3.1875	B	3.1834	B	3.1925	B	3.2142	B	3.2463			
相関係数			γ	0.9859	γ	0.9809	γ	0.9634	γ	0.9386	γ	0.9922	γ	0.9934	γ	0.9876	γ	0.9757	γ	0.9588			
データ数: (N) 平均値: ($\bar{x}$) 標準偏差 (σ_x)	11 3.59 0.79	確率 波高 (m)	1年	2.93	1年	2.74	1年	2.47	1年	2.09	1年	2.61	1年	2.37	1年	2.08	1年	1.76	1年	1.39			
			2年	3.27	2年	3.33	2年	3.42	2年	3.50	2年	3.32	2年	3.35	2年	3.38	2年	3.43	2年	3.48			
			5年	3.99	5年	4.12	5年	4.20	5年	4.24	5年	3.87	5年	3.98	5年	4.07	5年	4.15	5年	4.20			
			10年	4.64	10年	4.71	10年	4.71	10年	4.66	10年	4.41	10年	4.53	10年	4.62	10年	4.67	10年	4.68			
			20年	5.36	20年	5.30	20年	5.17	20年	5.02	20年	5.09	20年	5.19	20年	5.23	20年	5.21	20年	5.14			
			30年	5.81	30年	5.65	30年	5.43	30年	5.22	30年	5.58	30年	5.65	30年	5.62	30年	5.53	30年	5.40			
			50年	6.40	50年	6.09	50年	5.74	50年	5.44	50年	6.33	50年	6.29	50年	6.16	50年	5.96	50年	5.73			
			100年	7.24	100年	6.68	100年	6.15	100年	5.73	100年	7.61	100年	7.35	100年	6.98	100年	6.58	100年	6.18			
			200年	8.13	200年	7.27	200年	6.53	200年	5.99	200年	9.29	200年	8.64	200年	7.92	200年	7.24	200年	6.62			

藍島 11年統計 極値Ⅱ型(k=3.33)

