

波と風の複合外力下における浮体橋の弾性挙動に関する実験的研究

Experimental research on the dynamic motion of an elastic floating bridge in wave and wind

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*****
Jun Murakoshi, Koichiro Fumoto, Shuichi Nagata, Hideyuki Niizato, Shuji Shirai, Eiichi Watanabe and Tomoaki Utsunomiya

* 独立行政法人土木研究所, 構造物研究グループ (〒305-8516 つくば市南原 1-6)

** 工博, 日立造船株式会社, 技術研究所 鉄構・海洋研究室 (〒551-0022 大阪市大正区船町 2-2-11)

*** 日立造船株式会社, 技術研究所 鉄構・海洋研究室 (〒551-0022 大阪市大正区船町 2-2-11)

**** Ph.D., 工博, 京都大学教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

***** 工博, 京都大学助教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

Experimental equipments that measure dynamic motion of an elastic floating bridge in wave and wind are developed. A wave tank that has wave generator and wave-eliminating system at both ends is installed in the wind tunnel. The test model of the floating bridge consists of two pontoons, two bridge piers and the main girder. The pontoon and bridge pier are modeled as rigid bodies, and the main girder is modeled as elastic body. The girder ends are moored at the linear spring in both the perpendicular direction and the bridge axis direction, and are moored at the equipments that have the nonlinear restoring force characteristics in the horizontal direction. Each pontoon is moored at four elastic lines at four corners. In experiments, motions of the elastic floating bridge and mooring forces are measured in wave and wind. The calculation results for the response of the floating bridge in wave are compared with experimental results.

Key Words: floating bridge, elastic model, non-linear mooring system, external force in wave and wind

キーワード: 浮体橋, 弾性模型, 非線形係留装置, 波と風作用外力

1. はじめに

浮体式橋梁は, 橋脚の設置が不要なため, 従来型の橋梁では架設困難な大水深域や軟弱地盤層の厚い地点においても架設可能で, 橋脚を設置する固定橋と比較すると海上での作業が少なく, 工期が短縮できるという利点がある。我が国においては, 大阪市臨海部埋立地の舞洲と夢洲を結ぶ連絡橋として, 旋回式浮体橋である夢舞大橋が平成 12 年に建設されている。この橋は, 2つのポンツーンによって橋の上部工を支える形式で, ゴムフェンダーで係留されている。このような浮体橋の設計¹⁾に当たっては, 構造の弾性影響を考慮した浮体橋の風・波作用下での挙動を把握する必要がある。そのためには, 風と波作用下での骨組構造浮体橋の挙動解析法の開発が必要となるが, その解析法を検証するための実験データも必要である。

実験的に浮体橋の挙動を計測した例としては, 造波水槽に浮体橋剛体模型を浮かべ, 波と風荷重に相当する力をアクチュエータで作用させた例^{2) 3)}, 造波水槽に弾性模型としての浮体橋を浮かべ, 浮体橋の波浪中挙動を計測した例⁴⁾があるものの, 浮体橋弾性模型に, 波と, 高さ方向に速度分布を持つ境界層乱流としての自然風対応の風を同時

に作用させた実験例はほとんどない。

本研究は, 大規模風洞の風路内に設置された造波水槽内に非線形係留した弾性構造の浮体橋を浮かべ, これをゴム防舷材対応の係留装置とカテナリー対応の線形バネで係留し, 風と波を同時に作用させた時の浮体橋の挙動と係留力を計測することにより, 浮体橋の挙動に及ぼす風と波の影響を調べたものである。また, 渡邊他⁵⁾によって開発された弾性浮体橋を対象とした波浪応答シミュレーションプログラムを用いた実験対応の計算も行い, その結果も併せて示している。

2. 実験方法

2.1 概要

図-1に示すように, 日立造船(株)所有の風洞設備の長さ 23.3m, 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。浮体橋模型は, 箱型断面構造の上部工とそれを支持する 2 個の箱形ポンツーン及び上部工とポンツーンを繋ぐ橋脚からなる。上部工は弾性模型, ポン

ツーン及び橋脚は剛体模型である。この浮体橋が漂流しないように、浮体橋の桁端位置とボンツーンを線形バネで、また、桁端を橋直水平方向にゴム防舷材を模擬した非線形係留装置で係留する。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。実際の実験の様子を図-2、3に示す。

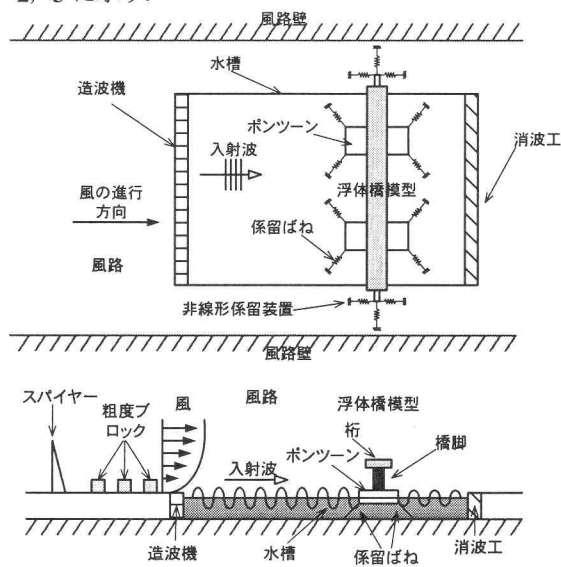


図-1 実験概要図

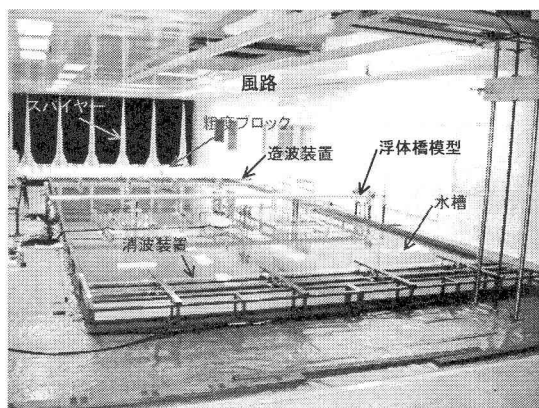


図-2 実験全体の様子

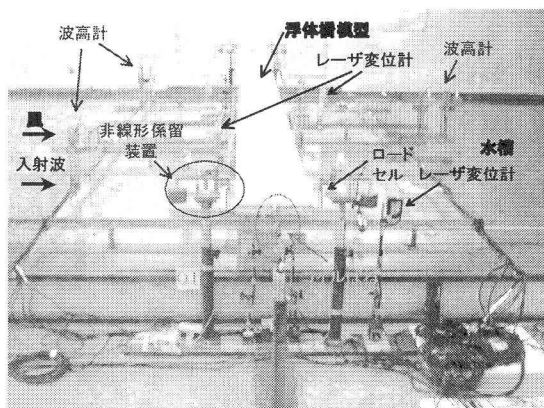


図-3 浮体橋の横方向からの様子

2.2 風洞設備

実験は、図-4に示すような日立造船(株)所有のゲッチンゲン型風洞で行った。風路の測定部寸法は、長さ23.3m、幅8m、高さ3mで、最大風速15m/sまでの実験が可能である。風路床の上流側には、粗度ブロック、スパイヤー等を設置して境界層乱流の実験ができるようにした。

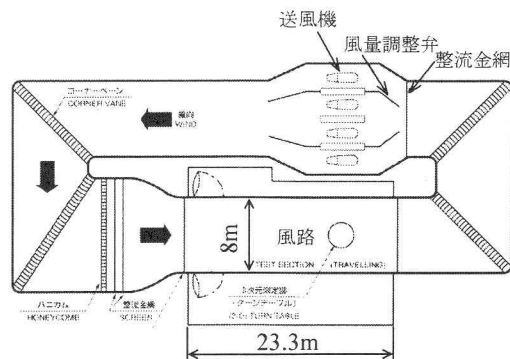


図-4 風洞設備の概要

2.3 実験水槽

本実験では、風洞の測定部に長さ12m、幅5.4m、深さ0.22mの造波水槽を設置した。設置や撤去を容易にし、かつ水槽自体の重量を低減するために、水槽は、steel製の骨組構造に、底板としての発砲材と側板としてのベニヤ板を取付け製作した。また、ポリエステル繊維の織物を軟質な合成樹脂フィルムでサンドしたビニール系の素材であるターポリンシートを水槽内側に張り付けることにより水漏れがないようにした。

2.4 造波装置

図-5に示すように、規則波を発生させることが出来る装置を設計製作し水路方向に設置した。PCから造波板の電圧を入力し、制御盤を介してモーターを回転し、ベルトを通じてプーリを制御させることで、伝達棒を平行運動させることにより造波板から波を発生させることができる。このとき、ピストン式の造波装置による発生波高は速度ポテンシャル理論によって次式で求められる。

$$\frac{H}{2\zeta} = \frac{4 \sinh^2 kh}{\sinh 2kh + 2kh} \quad (1)$$

ここで、H:波高、 ζ :造波板の片振幅、k:波数、h:水深。式(1)を利用して、造波機の振幅や周期を設定した時に発生する波の検定試験を、浮体橋模型を浮かべていない状態で実施して入力電圧を決定した。

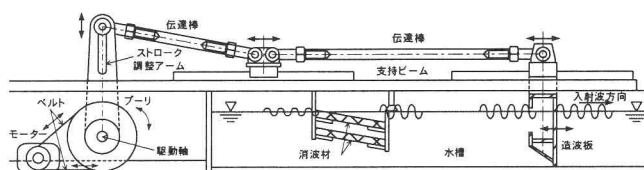


図-5 ピストン式造波装置

2.5 消波裝置

本実験では、規則波中での浮体橋模型の運動を計測するが、波下側には消波装置が必要となる。そこで、図-6に示すような消波装置を設計・製作した。

消波装置は2段階の消波構造を備えている。まず、波上側に反射率を低減させるための消波材を設置した。次に、ダムなどの流量調節として越流ゲート形式に用いられるクリーガー形状をしたパンチングメタルを設置して消波工とした。これは多孔材により、波エネルギー散逸促進を図るものである。

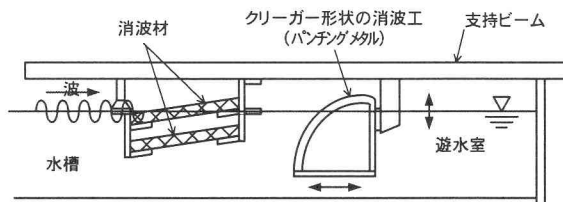


图-6 消波装置

2.6 浮体橋模型

浮体橋模型は、図-7に示すように、2個のボンツーン、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、上部工とボ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ある。模型の縮尺率は、流体に関するフルード則を満足させた 1/50 である。桁外形材は、ブロック長を 228mm とし、檜材を用いて製作した。表-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 ($B/D=7.5$) 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⁸⁾、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。捻り剛性についても実橋とほぼ相似になっている。ボンソー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。図-8 に桁の外形材及び剛性棒等を示す。

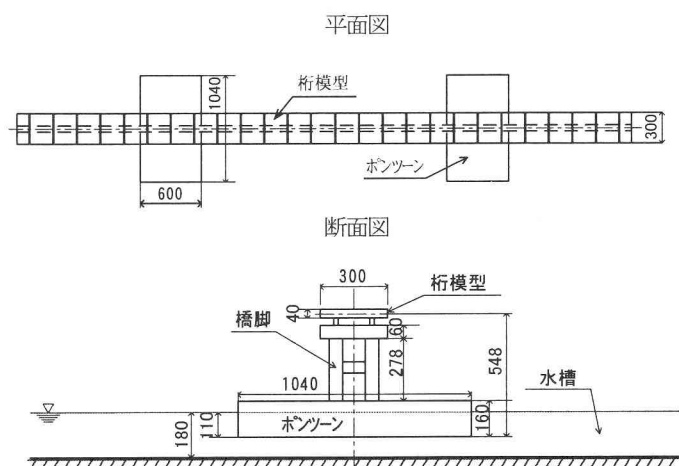
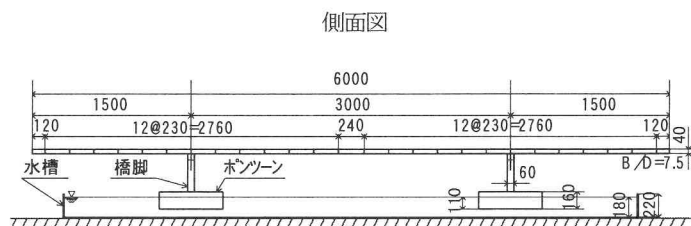


图-7 浮体橋模型 (单位:mm)

表-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)

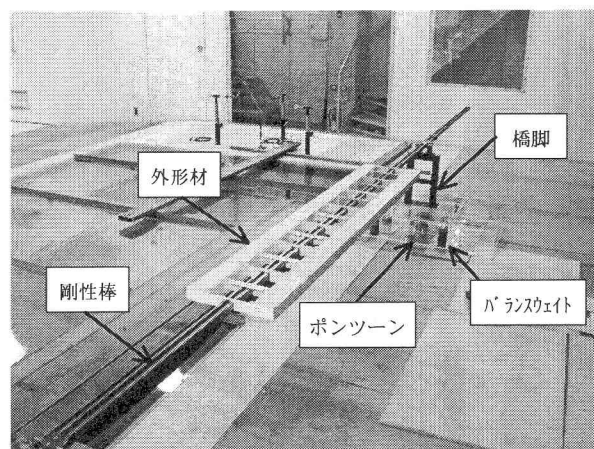


図-8 桁内部の剛性棒

2.7 係留方法

(1) 線形バネ係留

ポンツーンの係留配置図を図-9に示す。また係留バネの位置と名称の関係を図-10に示す。図-10に示すように、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

0.29kg/cm、2P-⑤及び 3P-⑤は 0.04kg/cm、2P-⑥～⑦及び 3P-⑥～⑦は 0.4kg/cm と設定した。

この内、桁端部の鉛直方向と橋軸方向のバネ 2P-⑤～⑦ 及び 3P-⑤～⑦のバネ定数は、この浮体橋模型が、7 径間連続鋼床板箱桁橋の中央部を対象にしていることから、浮体橋模型の両側に橋体が繋がっているという条件から設定した。また、ポンツーンバネ定数は、ポンツーンが適度に動揺するように設定した。

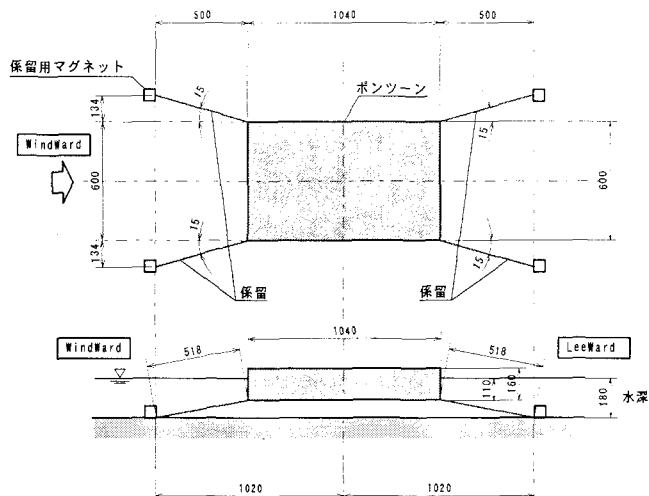


図-9 ポンツーンの係留

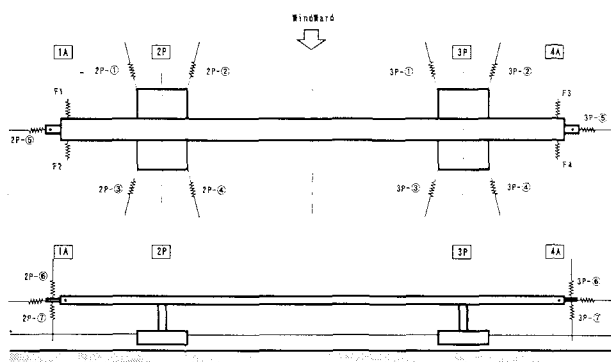


図-10 係留バネの配置と名称

(2) ゴム防舷材対応係留装置(非線形係留装置)

本実験では、桁端部の上下流側に非線形係留装置を2基ずつ、計4基設置した。その位置は、図-10のF1～F4である。

実際のゴム防舷材反力は、図-11(b)の破線で示すように、防舷材に対して非線形でヒステリシスを持つ。実験に用いた係留装置は、線形板バネ①、線形板バネ②とカウンターウェイトと梃子の原理を利用して、図-11に示すように、ゴム防舷材の変位-荷重曲線を折れ線で模擬するものである。

図-12の検定試験結果より、4基の非線形係留装置の内、4A上流側係留装置の初期立ち上がり部分のバネ定数は、他3基の係留装置のバネ定数より少々大きい値を示している。個々の非線形係留装置による特性の為であるが、数値計算と比較する際には注意を要する。

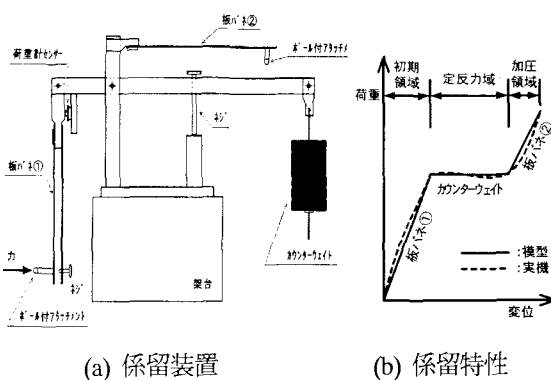


図-11 係留装置一般図及び係留特性

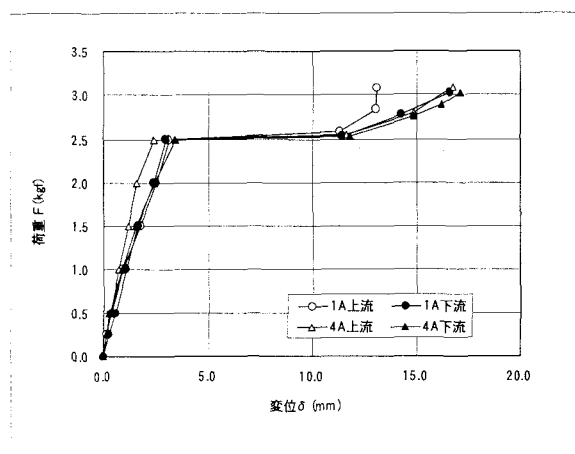


図-12 検定試験結果による係留特性

2.8 浮体橋の固有振動特性

水面に浮いた状態で、各部位が係留された浮体橋模型に強制変位を与えて主要振動モードの固有振動特性を計測した。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表-2に示す。

表-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

2.9 境界層乱流の特性

風洞の風路床の上流側には、粗度ブロック、スパイヤー等を設置して境界層乱流の実験ができるようにしている。浮体橋模型の設置場所近傍において所定の境界層乱流になっているかどうかを調べた。浮体橋模型設置位置の1.6m上流で計測した風速分布を図-13に示す。この結果は、X型熱線流速計を使用してサンプリング 100Hz で計測した20秒間平均値である。実験で目標とした境界層乱流は、風洞設備の性能より、鉛直方向の風速分布がべき指数 1/5の法則に従う境界層乱流とした。水面から44cm上方の桁位置で、主流水平方向の風速の乱れ強さ I_u は14%程度である。

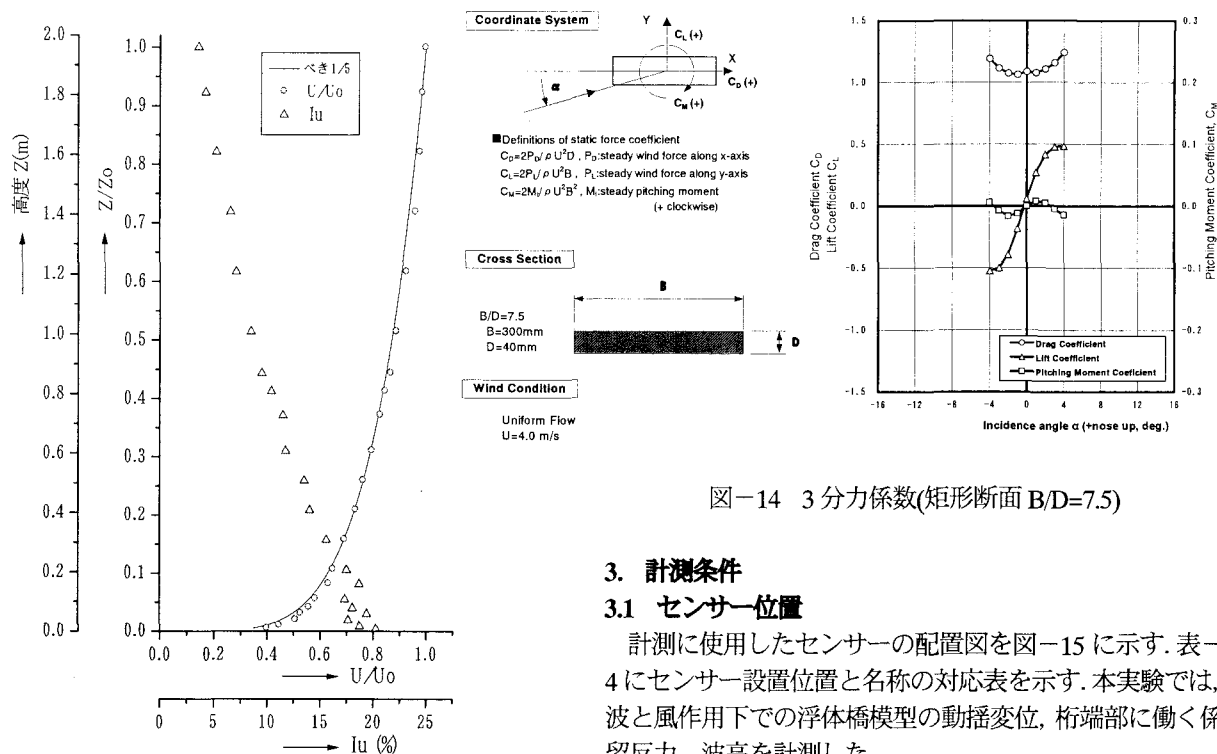


図-14 3分力係数(矩形断面 $B/D=7.5$)

3. 計測条件

3.1 センサー位置

計測に使用したセンサーの配置図を図-15に示す。表-4にセンサー設置位置と名称の対応表を示す。本実験では、波と風作用下での浮体橋模型の動揺変位、桁端部に働く係留反力、波高を計測した。

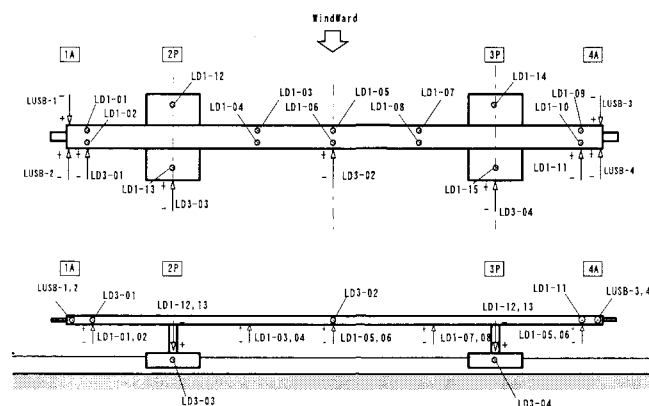


図-15 センサー計測位置

表-4 センサー位置対応表

部位	方向	計測機器	使用台数
1A 桁端	桁変位:		
	鉛直方向 (LD1-01, LD1-02)	レーザー変位計	2
	水平方向 (LD3-01)	レーザー変位計	1
	係留ばね荷重:	ロードセル	2
中央径間L/4	桁変位:		
	鉛直方向 (LD1-03, LD1-04)	レーザー変位計	2
	水平方向 (LD3-02)	レーザー変位計	1
	係留ばね荷重:	ロードセル	2
中央径間L/2	桁変位:		
	鉛直方向 (LD1-05, LD1-06)	レーザー変位計	2
	水平方向 (LD3-03)	レーザー変位計	1
	係留ばね荷重:	ロードセル	2
中央径間3L/4	桁変位:		
	鉛直方向 (LD1-07, LD1-08)	レーザー変位計	2
	水平方向 (LD3-04)	レーザー変位計	1
	係留ばね荷重:	ロードセル	2
4A 桁端	桁変位:		
	鉛直方向 (LD1-09, LD1-10)	レーザー変位計	2
	水平方向 (LD3-05)	レーザー変位計	1
	係留ばね荷重:	ロードセル	2
造波板付近	入射波方向	波高計	2
	ポンツーンより波上側	波高計	1
	ポンツーンより波下側	波高計	1
	中央径間L/2付近	波高計	2

2.10 箱桁断面の抗力係数

浮体橋模型上部工の箱桁断面の桁幅と桁高さの比: $B/D=7.5$ の場合に関する静的空気力係数を表-3に示す。これは、別途行った2次元箱形断面に関する風洞実験から得られたもので、一様流中に固定している箱型断面に作用する空気力に関する抗力係数、揚力係数、空力モーメント係数である。図-14より分力係数の定義などを示す。入射角の表示として標準書式⁶⁾に従った。

表-3 分力係数 ($B/D=7.5$)

断面諸元		
辺長比 B/D		7.5
全幅 B	(mm)	300
高さ D	(mm)	40
スパン	(mm)	1800
投影面積 A_D	(m^2)	0.072
投影面積 A_L	(m^2)	0.540
投影面積 A_M	(m^2)	0.162
気流条件		
気流		一様流
風速	(m/s)	4.0

3分力係数計測結果			
迎角 ALPHA (DEG)	抗力係数 DRAG-F C-(D)	揚力係数 LIFT-F C-(L)	空力モーメント係数 MOMENT C-(M)
-4	1.191	-0.523	5.90E-03
-3	1.115	-0.499	-7.50E-03
-2	1.074	-0.393	-1.60E-02
-1	1.063	-0.183	-1.21E-02
0	1.088	0.059	-1.00E-04
1	1.077	0.270	7.90E-03
2	1.106	0.413	4.80E-03
3	1.156	0.475	-4.70E-03
4	1.240	0.486	-1.38E-02

3.2 実験ケース

外力として、①風が単独で作用する場合、②波が単独で作用する場合、③風と波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。

③の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。なお、実験では、風の作用で水槽内に波が発生するが、この波の波高は、吹送距離が短い事、計測は吹送時間が短い範囲で終了している事により、非常に小さいものとなっている。また、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。詳細な実験ケースを以下に示す。

- ・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：0.29(kg/cm)
- ・気流条件：境界層乱流(1/5 ベキ関数)

4. 実験結果

4.1 外力が風単独の場合

まず、外力として風が単独に作用する場合での浮体橋の桁の各位置及びポンツーンの各風速に対する静的変形及び最大応答変位を図-16～17に示す。図の縦軸は、鉛直変位、水平変位及び振れ変位（ポンツーンの場合は Roll 角）である。次に、図-19 に風作用下での桁変位の様子を表す。実線は無風の静止状態、点線は風荷重が作用している状態を表している。防舷材対応係留の静的変形、反力の平均値、最大応答変位及び最大応答反力をそれぞれ図-20～23に示す。また、図-18に示すように係留変位と係留反力は圧縮を正と定義する。橋体の静的変形量に関する図-16において、1A 桁端部、中央径間 L/4 点、中央径間 L/2 点の鉛直変位が正で、4A 桁端部の鉛直変位が負であり、これは図-19 に示す中央部が最大で桁端部が最小に変位する対称 1 次モードの振動からわずかにずれている。また、図-17の鉛直方向の最大応答変位で、各風速に対して 1A 桁端は 4A 桁端の変位より大きくなっている。このような橋体の鉛直変位に関する橋軸方向の非対称性は、図-12に示すように、桁端部を係留している 4A 上流側の非線形係留装置の線形領域バネ定数が、他の 3 基の係留装置バネ定数より多少大きいこと、これらの非線形係留装置の荷重作用点と橋体の間には遊間部が無く摩擦力も発生することも原因となっているものと思われる。

橋体の静的変形量に関する図-16において、全ての計測点で水平変位は負である。また、図-17より、水平変位振幅は桁中央部で最大であることがわかる。

振れ変位に関しては、図-16 から、風速が大きいほど振れ変位は大きく、橋軸方向にほぼ一様に変位していることがわかる。また、図-17 の各風速に対する 1A 桁端と 4A 桁端による変位の差はそれぞれ上流側における非線形係留装置の特性の違いによるものと思われる。

図-20～23 に示されるように、ゴム防舷材対応の非線形係留装置の静的変形量は、1A 側と 4A 側の上流位置で負の値を、下流位置での変位は正の値を示している。これ

は、桁端部が水平方向(橋軸直角方向)に風下側に変位していることを示している。但し、1A 側と 4A 側の各風速に対する変位や反力の違いは 1A 側上流の 4A 側上流に対して約 5 割～7 割である。これも桁端部に設置した非線形係留装置の線形領域での係留反力特性の違いによるものと推測される。

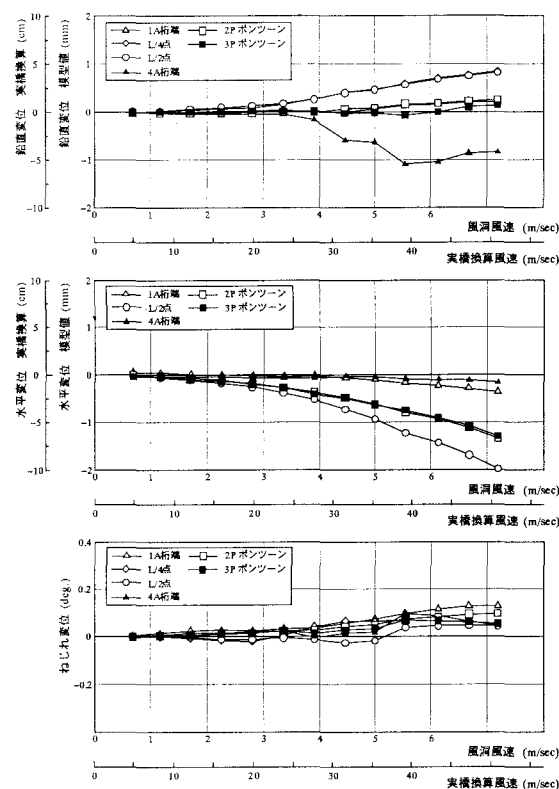


図-16 静的変形量

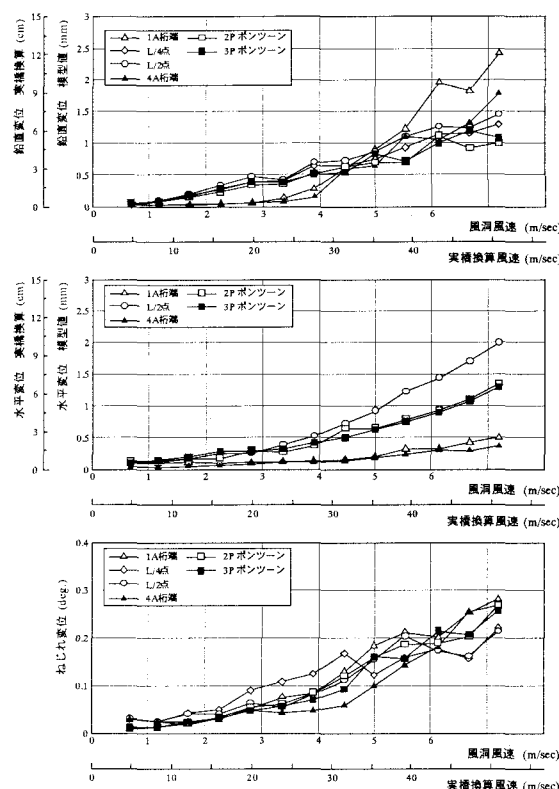


図-17 最大応答変位

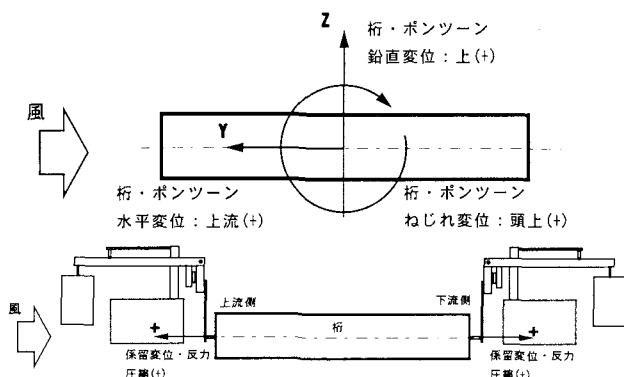


図-18 係留変位・反力計測時符号定義

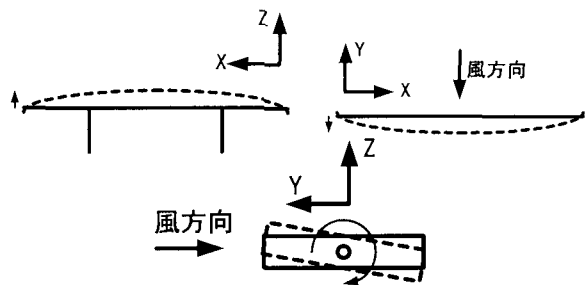


図-19 風影響による桁変位の様子
(左上図から時計回りに鉛直方向, 水平方向, 捩れ方向)

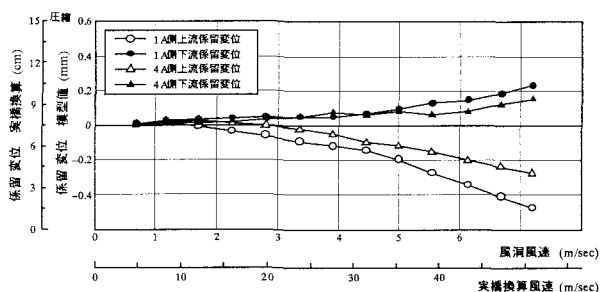


図-20 防舷材対応係留 静的変形量

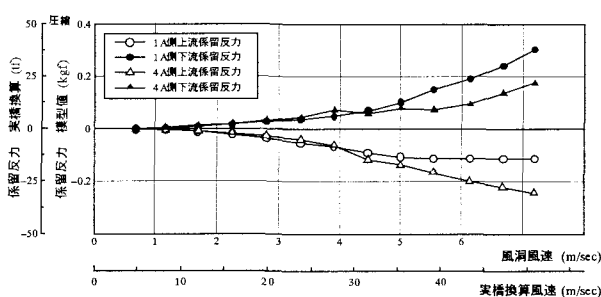


図-21 防舷材対応係留 反力平均値

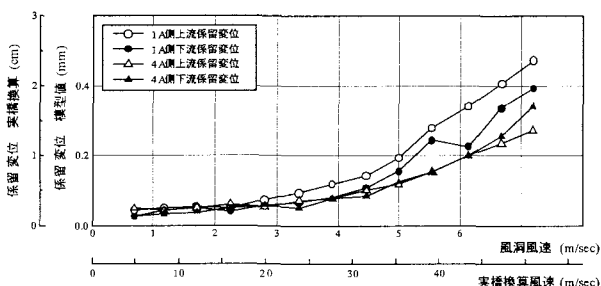


図-22 防舷材対応係留 最大応答変位

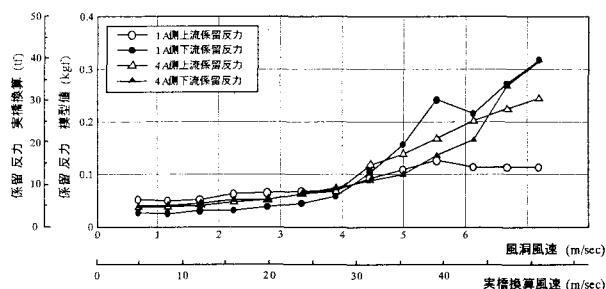


図-23 防舷材対応係留 最大応答反力

4.2 外力が波単独の場合と波と風が同時に作用する場合

図-24 と図-25 は、波と風の外力が同時に作用する場合の実験結果で、水平と回転応答がピークとなる波周期での浮体橋の動揺変位と入射波の時系列を示している。波周期の数値は実機換算値である。時系列には、浮体橋からの散乱波が水槽側壁に反射した影響も現れている。ここで、反射波の影響が少ない領域である 10s~20s の範囲のデータを用いて解析した。

図-26 は、外力が波単独の場合と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 $L/2$ 位置での橋体の水平、鉛直、捩れ変位の両振幅最大値に関する周波数特性を示している。捩れ変位に関しては風の影響は小さいが、橋体の水平と鉛直変位に関しては、桁断面に作用する風荷重が影響し、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大きくなる傾向にある。また、波周期 6s 付近に水平変位応答のピークが現れている。これは、表-2 に示す、この周期が水平変位の固有周期に対応していることによる。また、鉛直方向に関しては、波周期が大きくなる程、応答の統計値も大きくなる傾向にある。これは鉛直方向の振動モードの固有周期が 14.4s 付近にあるためである。捩れ変位に関しては、浮体橋の回転振動モードの固有周期 9s 付近でピークを示している。

図-27 は、外力が波単独の場合で、各波周期での橋体の水平、鉛直、捩れ変位の両振幅最大値の橋軸方向分布を示している。縦軸は運動変位の両振幅を、入射波分離推定法⁷⁾を用いて求めた入射波高で除した無次元値である。桁の水平変位に関しては、桁中央部の変位応答が桁端部の応答より大きくなっていることがわかる。これは、浮体橋全体の水平曲げモードが現れ、桁の弾性影響が大きくなっていることを示している。桁の鉛直変位に関しては、桁中央部の変位応答が桁端部より大きい。これは、桁全体は時々刻々対称 1 次モードで弾性変形が現れ、桁端部は鉛直方向に係留反力が働くことによって、桁端部よりも中央部の応答の方が大きくなるためと思われる。また、桁の剛性棒の捻り剛性が一樣で、かつ同振幅・同位相の波が橋軸直角方向から入射するため、捻り変位は橋軸方向についてほぼ一樣であることがわかる。

図-28, 29 は、波と風が同時に作用する場合で、1A 側と 4A 側の上下流の桁端部に水平方向に設置した非線形係留装置に働く係留反力の周波数特性を示す。図中の破線は係留装置の変位-反力特性が線形領域から非線形領域に

変化する遷移点の反力 2.5kgf を示している。水平方向の振動の固有周期と波周期が同調している 6s 付近で上下流側の係留反力が共に大きくなっている。また、上流側反力よりも下流側の反力が大きくなっているがこれは浮体橋が風荷重により風下側に流されるためである。

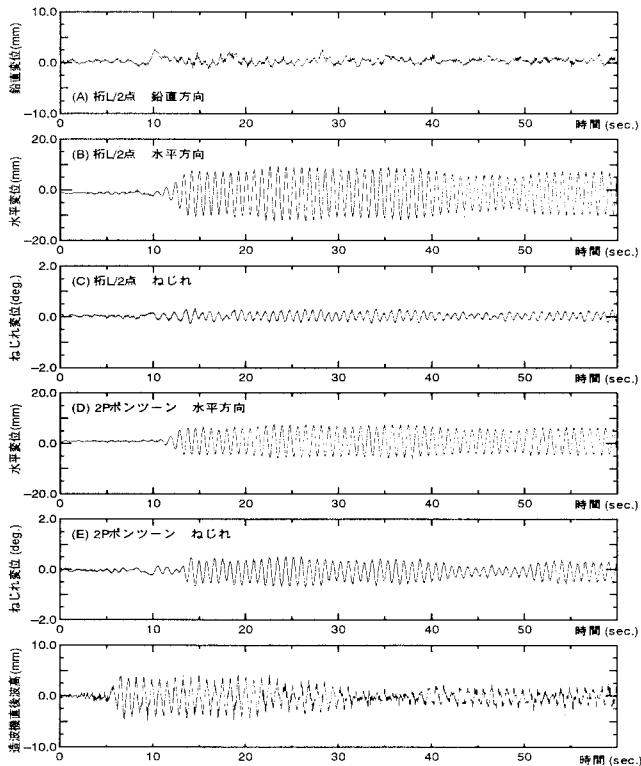


図-24 変位・波高の時系列
(水平応答ピーク付近 波周期: 6.0sec)

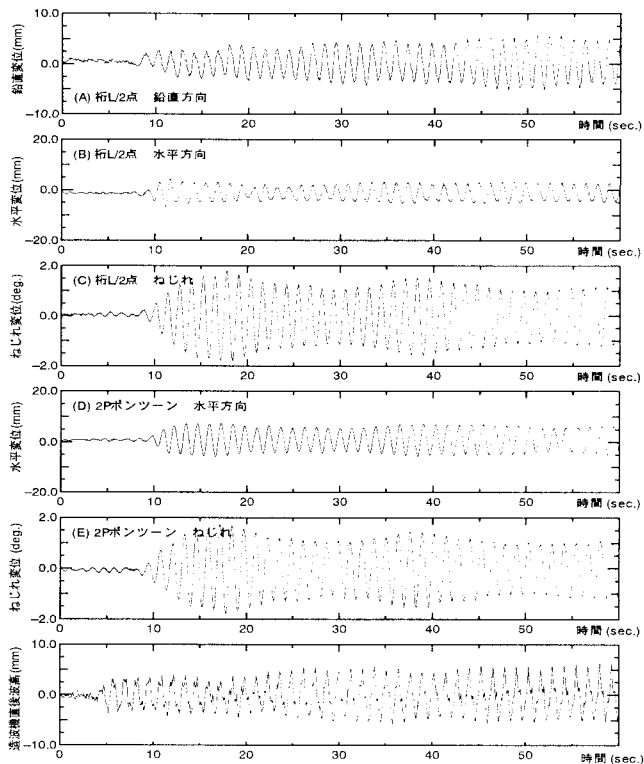


図-25 変位・波高の時系列
(回転応答ピーク付近 波周期: 9.0sec)

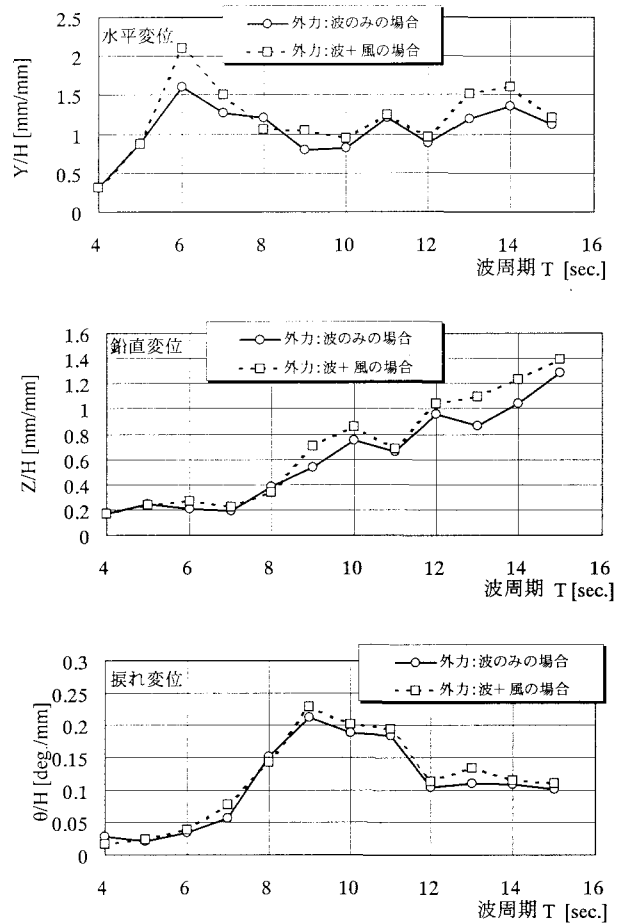


図-26 運動の変位の応答関数(中央径間 L/2 点)

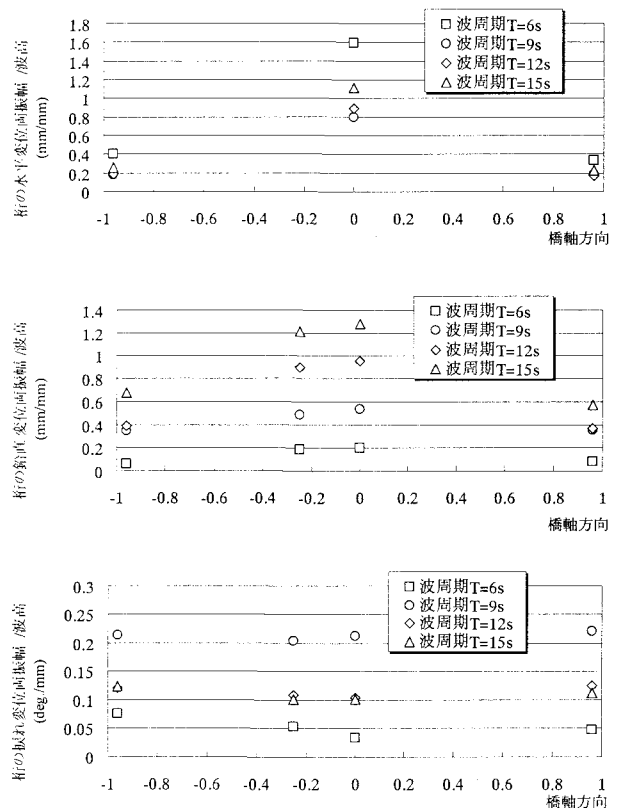


図-27 規則波による橋桁の応答変位

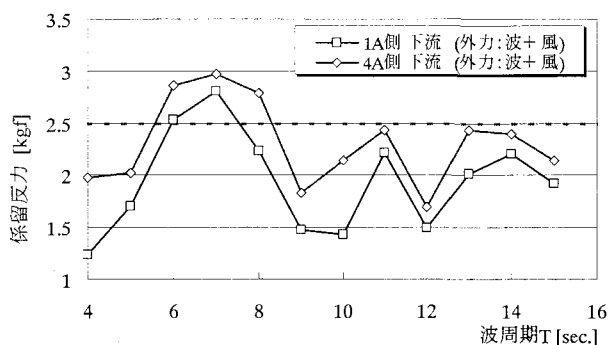


図-28 上流側に働く係留力の周波数応答関数

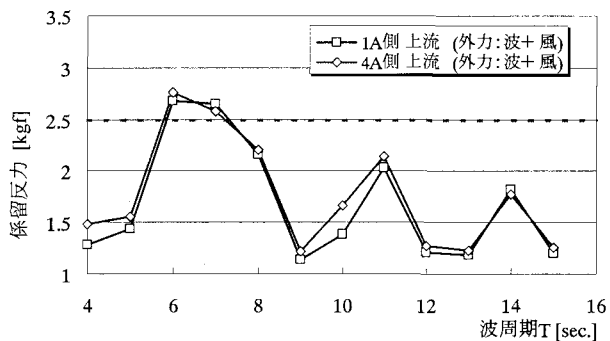


図-29 下流側に働く係留力の周波数応答関数

5. 浮体応答解析

浮体の応答解析は、外力が波のみの場合に関しては、渡邊他⁵⁾の手法に基づき、規則波中応答計算を実施した。計算は、浮体橋全体を剛体モデルとした場合と、浮体橋の桁部分を梁とした弾性モデルとした場合の2種類について行った。

ポンツーンにおける係留索と桁端部における係留装置はいずれも線形バネとしてモデル化し、周波数領域で解析した。ポンツーンに作用する流体力は単体ポンツーンのみを取り出して、水波 Green 関数を用いた境界要素法によりその付加質量、造波減衰係数及び波強制力を算出した。

中央径間 L/2 点、3P ポンツーン及び 4A 側桁端での各波周期に対する水平、鉛直、振れ変位についての解析値と実験値を図-30～32に示す。

図-30～32より剛体モデルと比べて、弾性影響を考慮した弾性モデルの解析結果の方が、実験結果と良く合致していることがわかる。これは実験では桁部を剛性棒で構成された弾性構造だからである。

図-30の水平変位及び図-32の鉛直変位において、特に、実験値と剛体モデルの解析値は波周期に対する傾向が合っていない。図-30に示す結果について、桁の中央径間 L/2 点において、実験では水平方向に関しては最も弾性挙動が生じやすく、桁端部よりも変位は大きくなり、対称1次モードの特性が表れるが、剛体モデルの解析では弾性影響は生じず、桁端部と同様に水平方向に変位する為に、剛体モデルの解析値は実験値より小さくなると推測される。図-32に示す結果について、実験では浮体橋の桁は鉛直方向に対して、弾性影響による対称1次モード特性が

表れ、浮体橋全体が鉛直変位する剛体モデルの解析結果よりも桁端点においては、実験値の方が剛体モデルの解析値よりも小さくなると推測される。

図-31の水平変位及び振れ変位において解析値が9s付近でピーク値を示す。解析では造波減衰の影響⁸⁾を考慮しているが、少々、過大評価となる傾向があると推測される。

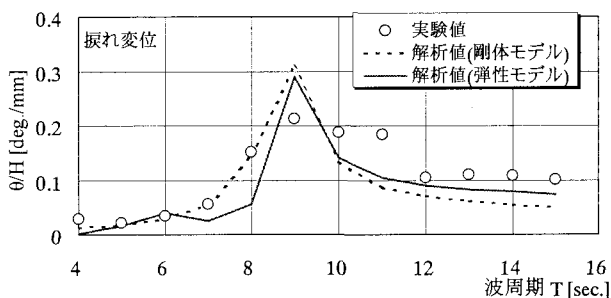
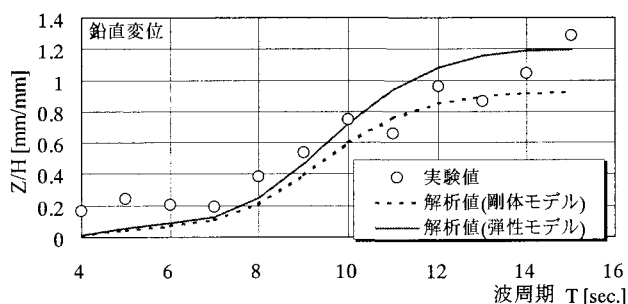
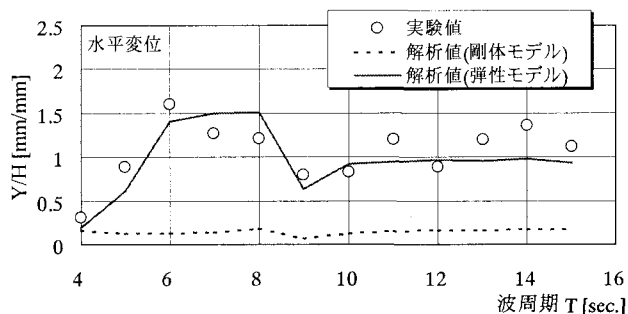
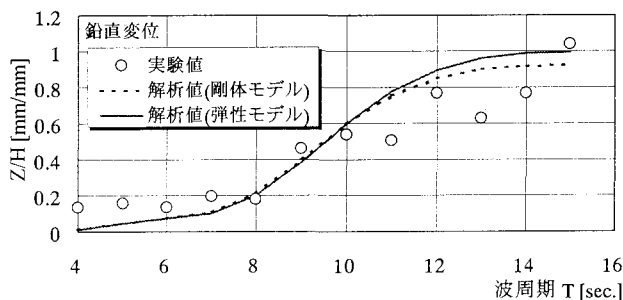
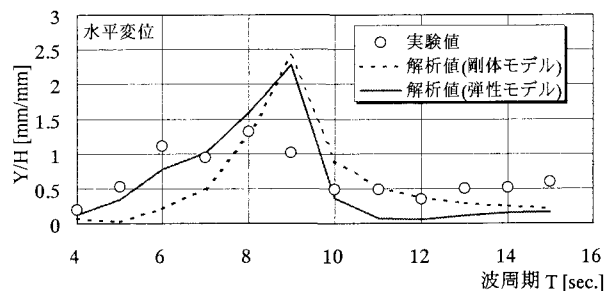


図-30 運動の応答関数 (中央径間 L/2 点)



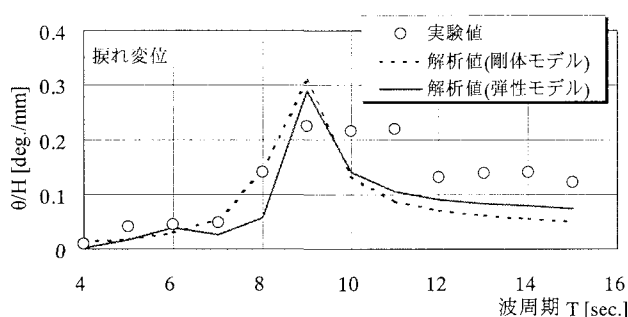


図-31 運動の応答関数 (3P ポンツーン)

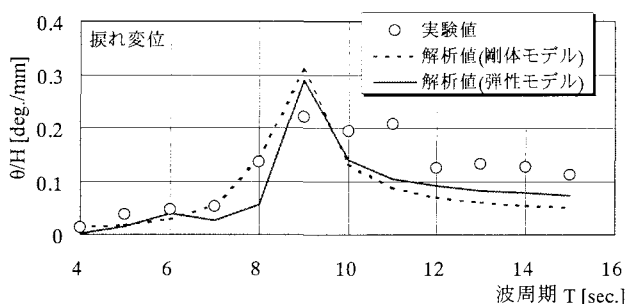
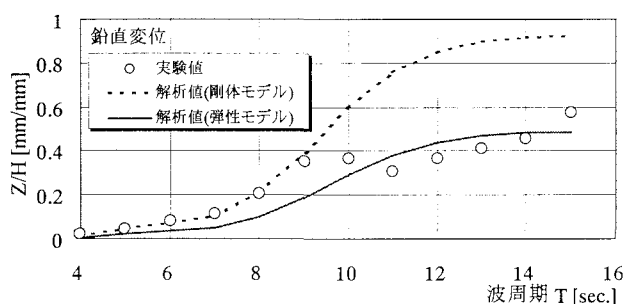
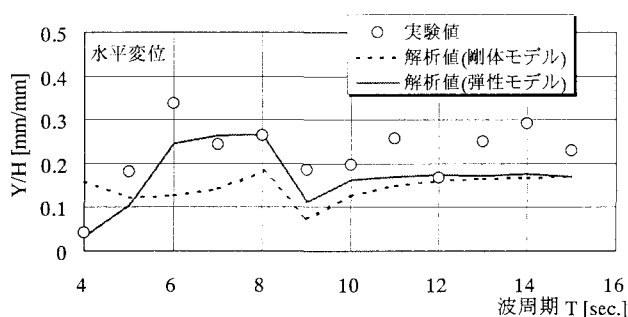


図-32 運動の応答関数 (4A 側 桁端点)

6. まとめ

本研究では、風洞設備の風路上に造波装置及び消波装置を備えた造波水槽を設置し、2車線を有する自動車専用道路用の7径間連続鋼床版箱桁橋の中央部に対応する浮体橋弾性模型を浮かべて係留し、これに、風単独、波単独、風と波を同時に作用させた場合のそれぞれについ

て、浮体橋の動揺実験を実施し、浮体弾性応答に及ぼす風や波の影響を調べた。

実験では、端部係留に、ゴム防舷材の変位-荷重特性を模擬した非線形係留装置を用いた。

この結果、以下の知見を得ることができた。

- ①本実験設備を用いる事で、風と波の同時作用下における浮体橋の弾性応答実験が可能であることが確認された。
- ②外力が波単独と風単独の場合を比較すると、浮体橋の弾性変位は、風の影響よりも波の影響が顕著であり、波周期が桁の振動モードの固有周期と一致する時、浮体橋全体の変位応答は大きくなることがわかった。
- ③風と波が同時に作用する場合、浮体橋は、桁断面に水平方向に働く風荷重の影響を受け、波下側に静的変位した後、その位置の回りに各モードで動揺すること、鉛直方向には対称1次モードで振動すること、捩れ変位はほぼ橋軸方向に一樣に変動することが確認された。
- ④渡邊他によって、外力が規則波単独の場合の浮体橋応答を周波数解析した結果、弾性影響を考慮した弾性モデルの解析結果と実験結果は良く一致していることが確認された。

なお、本研究は、独立行政法人土木研究所委託研究「浮体橋の波浪・風作用下での動揺解析手法の開発」の一部として、京都大学、日立造船株、新日本製鐵株、(株)建設技術研究所との共同研究として実施したものである。

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会浮体橋の研究小委員会：浮体橋の設計指針(案)，2002。
- 2) 丸山忠明，川村幸男，武田純男，永田修一，三宅成司郎，藤田孝：浮体式橋梁の波浪中動揺に関する水理実験，海岸工学論文集，Vol.44，pp.896-900，1997。
- 3) 永田修一，三宅成司郎，藤田孝，吉田尚史，武田純男，丸山忠明，上田茂：旋回式浮体橋の波浪中動揺実験，日本造船学会第14回海洋工学シンポジウム，pp.335-342，1998。
- 4) 岡俊蔵，熊本直樹，井上幸一，池上国広，瀬戸秀幸，上田茂，丸山忠明：浮体橋梁の波浪に対する弾性応答解析法の開発，三菱重工技報，Vol.36 No.5，pp.234-237，1999。
- 5) 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。
- 6) 本州四国連絡橋公団：本州四国連絡橋 風洞試験要領・同解説，pp.35-53，1980。
- 7) 合田良實：[増補改訂] 港湾構造物の耐波設計—波浪工学への序説，鹿島出版会，pp.253-258，1990。
- 8) Chakrabarti：Empirical calculation of roll damping for ships and barges，Ocean Engineering，Vol.28，pp.915-932，2001。

(2003年9月12日受付)