

III-9 浮体橋設計法の開発に関する調査

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）
 研究期間：平 14～平 15
 担当チーム：橋梁構造チーム
 研究担当者：村越 潤、麓 興一郎

【要旨】

海上を横断する構造物の実現に向けて、大幅なコスト縮減を可能とする新たな構造物の技術開発が求められている。本研究では、水の浮力を利用することにより下部構造が省略可能となる浮体橋を取り上げ、浮体橋特有の外力である波浪に対する動揺量推定手法の開発を目標とする。具体的には、動揺量推定手法の開発、水槽模型実験による動揺量推定手法の精度検証、および浮体橋の適用可能性の検討を行った。

キーワード：浮体橋、動揺量推定、水槽模型実験、波浪応答、波浪条件

1. はじめに

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、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、設計の基本的事項が定められた指針¹⁾はあるものの、最も重要となる動揺量推定に関してその具体的手法は確立されていないのが現状である。また、波浪条件の厳しい我が国においては浮体橋の適用性の可否が課題となっている。

本研究では、浮体橋の設計手法を開発することを目的に、以下の検討を行った。

- ① 風の影響を考慮した動揺量推定手法（非線形時刻歴応答解析プログラム）の開発
- ② 水槽模型実験による動揺量推定手法の検証
- ③ 我が国沿岸域における浮体橋の適用可能性の検討

2. 研究方法

2.1 風の影響を考慮した動揺量推定手法の開発

浮体橋の動揺量推定手法について、これまで周波数応答解析プログラムを京都大学、新日本製鐵(株)、Hitachi 日立造船(株)、(株)建設技術研究所との共同により開発してきた。本研究では、図-1 に従って、流体力の周波数依存性や係留系の非線形復元力特性を考慮した非線形時刻歴応答解析プログラムの開発を行うとともに、作用外力として波と風荷重が同時に作

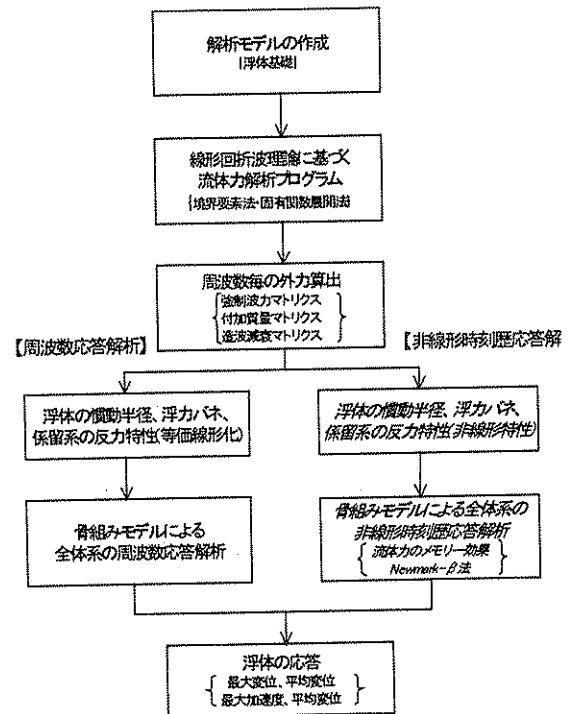


図-1 動揺量の推定手順

用した場合の動揺量を解析できるものとした²⁾。

2.2 動揺量推定手法の実験的検証

開発した非線形時刻歴応答解析による動揺量推定手法の精度を検証するために、浮体橋の水槽模型実験を実施した³⁾。風洞実験施設に設けられた造波水槽内に浮体橋の弾性模型を浮かべ、波と風を同時に作用させた時の浮体橋模型の挙動や係留力を調べた。

2.3 適用可能性の検討

開発した動揺推定プログラムを用いて、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。適用可能性は、動揺時の車両の走行安定性、下部構造を有する一般的な橋梁と比較した場合の経済性の観点から検討を行った。

3. 研究結果

3.1 開発した動揺量推定手法

過年度の研究において開発した周波数応答解析プログラムでは、係留系の非線形復元力特性が考慮できない。精度の高い動揺量を推定するためには係留系の非線形特性を考慮する必要がある。そこで、これを考慮することが可能な時刻歴応答解析プログラムを開発した。当プログラムは、周波数依存性を有するラディエーション流体力に関するメモリー影響と、係留系の非線形復元力特性を考慮した非線形運動方程式(式(1))を Newmark-β法と組み合わせてモード法により解析するものである。なお、モード法は解析時間の短縮化を図るために採用した。

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

- $x_i, \dot{x}_i, \ddot{x}_i$: 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。

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

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。

$$a_{ij}(\omega) - a_{ij}(\infty) = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b_{ij}(\omega') \frac{d\omega'}{\omega^2 - \omega'^2} \quad \dots \text{式(3)}$$

強制外力 $F_i(t)$ としては、風荷重、波荷重、潮流力を扱うことができる。

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(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)。

$$\begin{aligned} \{\ddot{\zeta}\} + [\phi]^T [B] [\phi] \{\dot{\zeta}\} + [\omega^2] \{\zeta\} \\ = -[\phi]^T \{G(x)\} + [\phi]^T \{F(t)\} \\ - \int_0^t [\phi]^T [L(\tau)] [\phi] \{\zeta(t-\tau)\} d\tau \end{aligned} \quad \dots \text{式(4)}$$

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。

$$-\omega_r^2 [m + a(\infty)] \{\phi_r\} + [C] \{\phi_r\} = \{0\} \quad \dots \text{式(5)}$$

$$[\phi] = [\{\phi_1\}, \dots, \{\phi_M\}] \quad \dots \text{式(6)}$$

$$[\omega^2] = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \omega_M^2 \end{bmatrix} \quad \dots \text{式(7)}$$

3.2 水槽模型実験による動揺量推定手法の検証

3.2.1 実験方法

(1) 概要

図-2 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：0.29(kg/cm)
 - ・気流条件：境界層乱流(1/5 べき関数)
- 実験の様子を図-3、4に示す。

(2) 浮体橋模型

浮体橋模型は、図-5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

取り付けした上部工、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-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

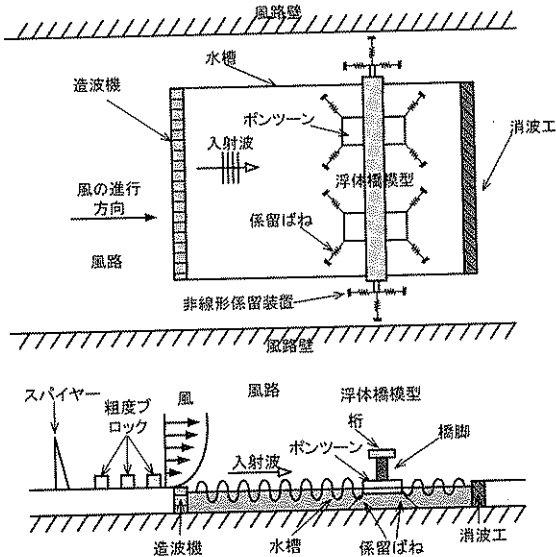


図-2 実験概要図

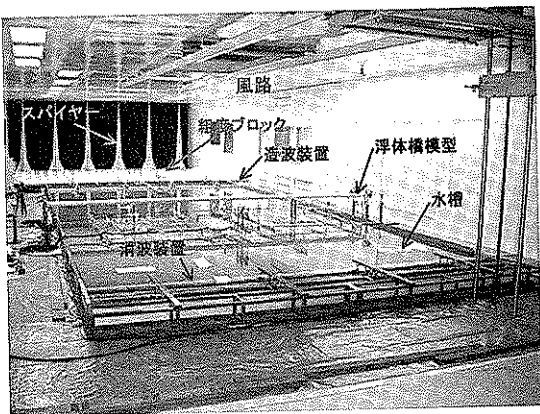


図-3 実験全体の様子

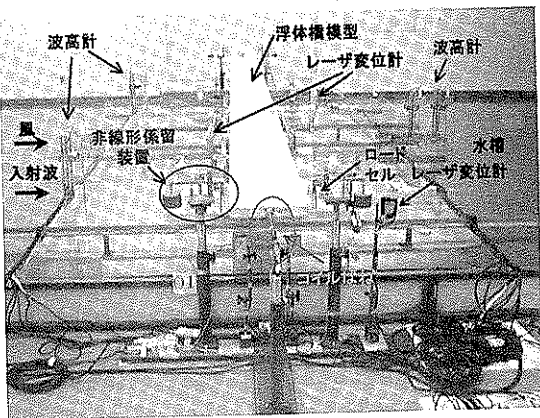


図-4 浮体橋の横方向からの様子

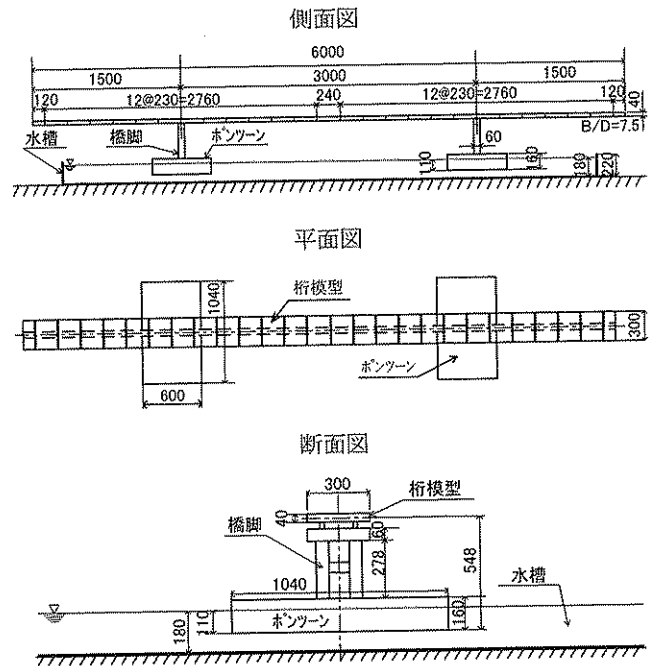


図-5 浮体橋模型 (単位:mm)

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)

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-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。

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

(3) 係留方法

図-6 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

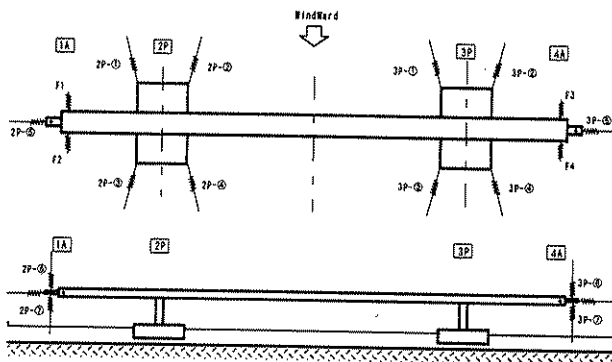


図-6 係留バネの配置と名称

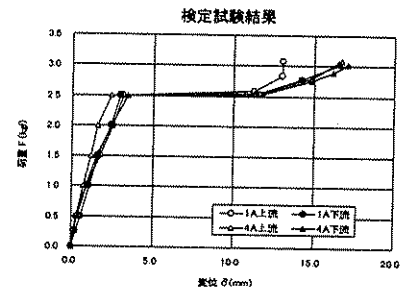
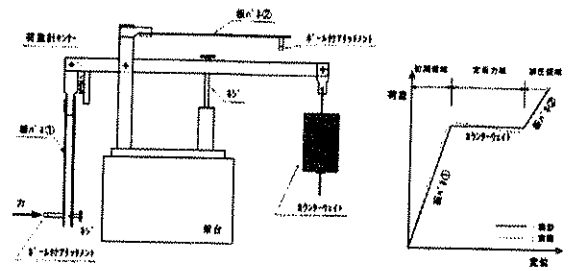


図-7 係留装置一般図及び係留特性

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である。

図-6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-7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。

3. 2. 2 実験結果

実験は、風が単独に作用する場合、波が単独に作用する場合、そして風と波が同時に作用する場合について行った。図-8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、模型の応答変位は一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-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。

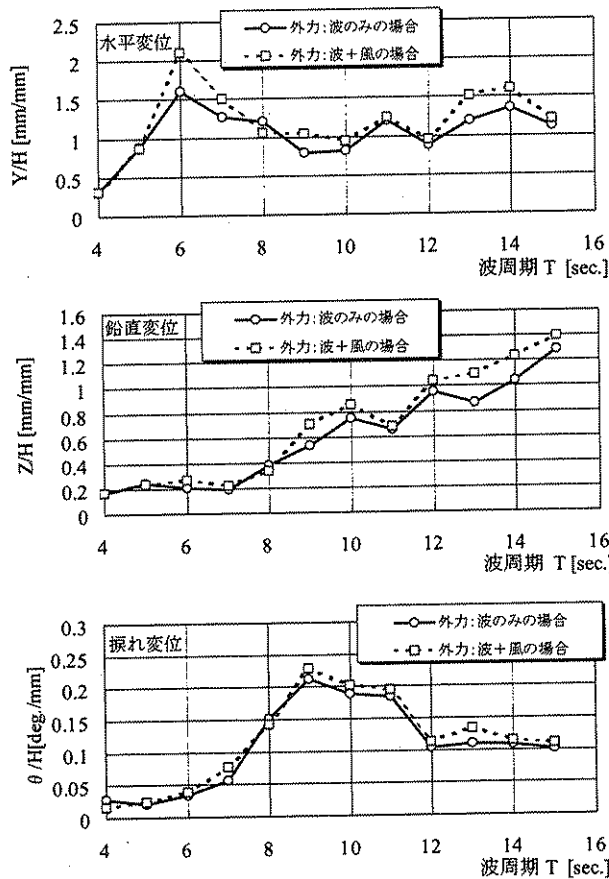


図-8 模型変位の周波数特性 (中央径間 L/2 点)

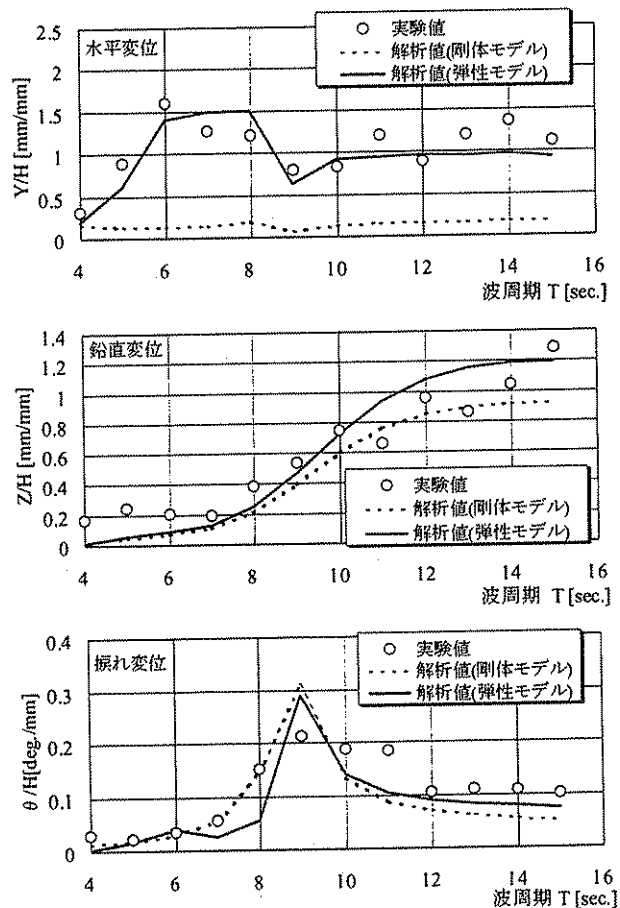


図-9 模型の応答変位における実験値と解析値の比較 (中央径間 L/2 点)

3. 2. 3 実験値と解析値の比較

3. 1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-9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。

3. 3 適用可能性の検討

3. 3. 1 動揺時の車両走行性に着目した検討

本検討では、まず、周波数応答解析により浮体橋の適用が可能となる波浪条件(有義波)を把握する。次に、日本沿岸部における波浪観測データから把握した波浪条件を満たす地域を絞り込む(一次選定)。最後に、非線形時刻歴応答解析により一次選定された地域の適用可能性の再評価を行う(二次選定)。なお、車両の走行安定性に着目した応答加速度の許容値として、ここではノルウェーの基準(水平、鉛直加速度 0.6m/s^2)を用いた。

(1) 浮体橋が適用可能な有義波の検討

周波数応答解析により浮体橋の適用性が高い波浪条件(有義波 $T_{1/3}$, $H_{1/3}$)を把握する。検討の対象とした浮体橋モデルを図-10に示す。本橋は、浮体基礎を分離型ポンツーン、係留システムをチェーン係留およびフェンダー係留とした構造である。このモデルに対して、有義波諸元 ($T_{1/3}$, $H_{1/3}$) をパラメー

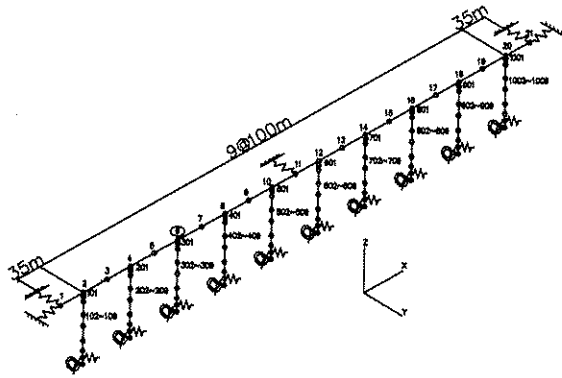


図-10 解析モデル

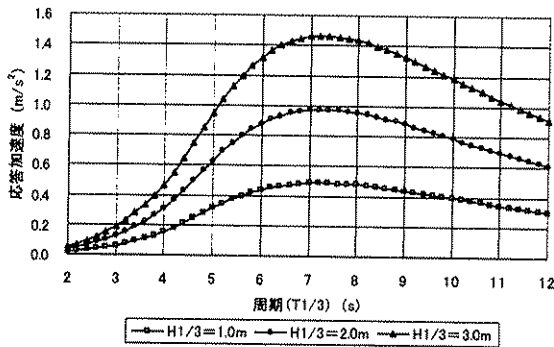


図-11 波周期と応答加速度の関係 (節点6)

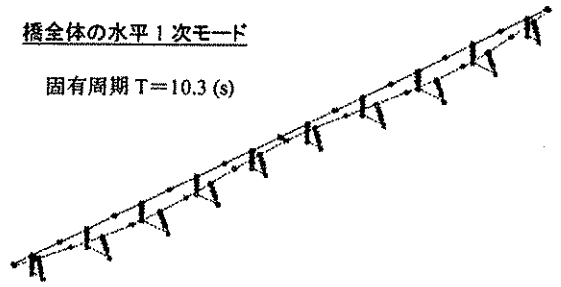
タとした周波数応答解析を実施した結果を図-11に示す。同図は、桁の水平方向支間中央位置(フェンダー間中央位置である節点6)でのSway(橋軸直角方向の左右揺れ)の応答加速度を示している。本橋の水平一次モード(橋全体の水平モード)は10.3秒、桁の水平一次モードは6.8秒である(図-12)。節点6の応答加速度のピークは、有義波高によらず桁の水平モードの固有周期にほぼ一致している。図-11の解析結果に基づき応答加速度 0.6m/s^2 となる有義波を整理した図-13から、許容値を満足する有義波の限界は、例えば、 $H_{1/3}=2.0\text{m}$ と $T_{1/3}=5.0\text{sec}$ の組み合わせ、 $H_{1/3}=3.0\text{m}$ と $T_{1/3}=4.0\text{sec}$ の組み合わせであることがわかった。

(2) 日本沿岸部における適用可能地域の選定 (一次選定)

(1)の結果を踏まえ、日本沿岸部における波浪観測データから、浮体橋の適用性が高い地域を絞り込む。図-14には港湾技研資料⁴⁾からまとめた観測波高の出現確率を表している。一方、本検討で想定している波浪は供用時の波であることから、強風によるトラックの横転事例⁵⁾を参考に、車両の交通規制風速を $v=23\text{m/s}$ に設定した。そして、気象庁の風速観測データ⁵⁾から $v>23\text{m/s}$ となる日数を算出した。その

橋全体の水平1次モード

固有周期 $T=10.3$ (s)



桁の水平1次モード

固有周期 $T=6.8$ (s)

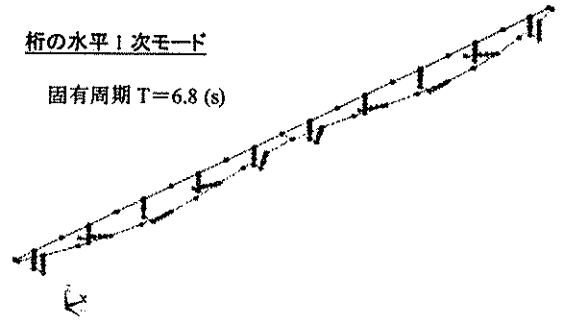


図-12 固有モード図

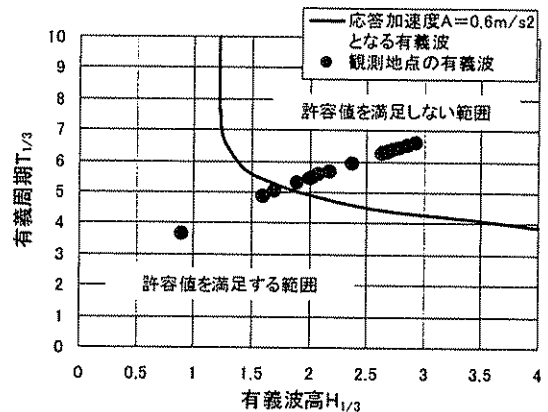


図-13 許容値を満足する有義波の範囲

結果、平均で年間9日、年間日数比2%の頻度で暴風($v>23\text{m/s}$)となったことから、(1)で設定した有義波が出現確率98%($=100-2$)以上となる観測地点を選定する。その結果、(1)で設定した有義波を満足する観測地点は、表-3および図-15に示す7地域となり、主に太平洋沿岸および瀬戸内海で適用性が高いことが確認できた。なお、表-3の Δ で示した4地点は、図-13に示した適用可能となるための有義波の範囲から若干超えているものの、時刻歴応答解析による詳細な検討では適用性を有する可能性があるため、一次選定に含めることとした。

(3) 日本沿岸部における適用可能地域の選定 (二次選定)

(2)の検討で選定された7地点に対して、非線形時刻歴応答解析による適用性の検討を行う。適用性の評価は、(2)と同様に節点6(上部構造フェンダー間

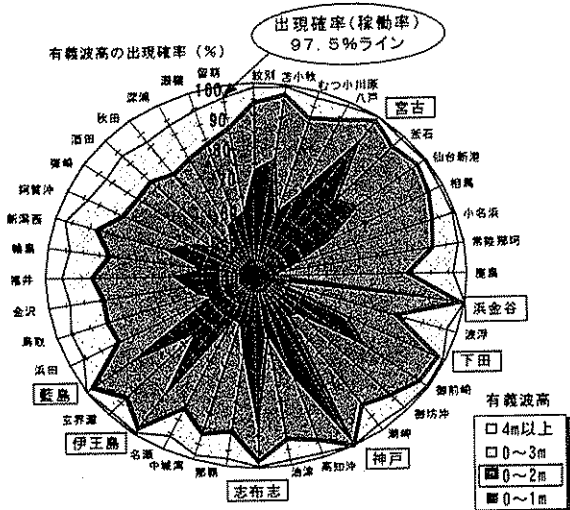


図-14 有義波高の出現確率

表-3 適用性の判定 (一次選定)

観測箇所	有義波		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	6.52	
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	6.52	

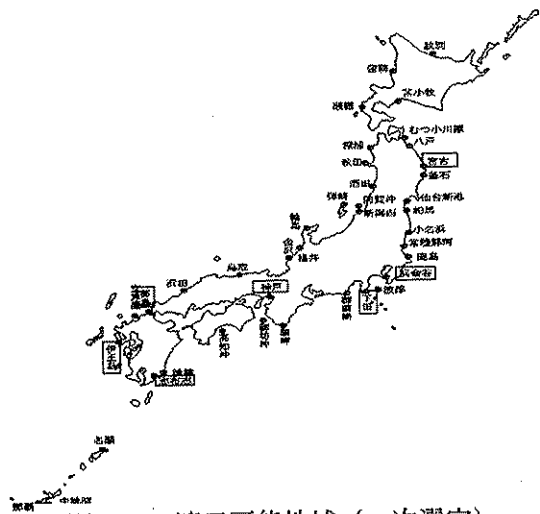


図-15 適用可能地域 (一次選定)

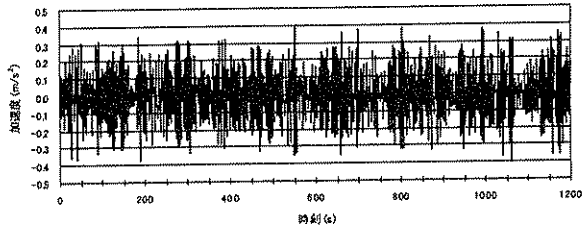


図-16 応答加速度 (浜金谷、節点6)

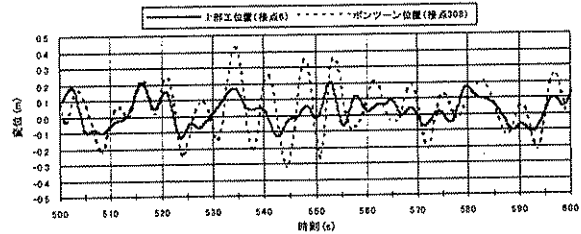


図-17 応答変位 (浜金谷)

表-4 時刻歴応答解析結果

観測地	応答値 (m/s^2)	有義波	
		波高(m)	周期(s)
宮古	0.196	1.60	4.88
浜金谷	0.229	1.70	5.03
下田	0.567	2.00	5.46
神戸	0.049	0.90	3.66
志布志	0.410	1.90	5.32
伊王島	0.410	1.90	5.32
藍島	0.410	1.90	5.32

注1) 応答値の単位は、 m/s^2
 注2) 許容値は、 $0.6m/s^2$

中央位置)の応答加速度による。図-16は、浜金谷における節点6の応答加速度の時刻歴を、図-17は節点6および節点308(ポンツーン位置)における応答変位の時刻歴をそれぞれ示す。図-17から、上部構造は桁の固有周期(6.8秒)で振動しているのに対し、ポンツーンは有義波の周期($T_{1/3}=5.03$ 秒)で振動しているのが確認できる。解析の結果を表-4に示した。同表から、7地点ともに節点6の応答加速度が許容値($0.6m/s^2$)を満足し、適用性を有することがわかった。

3. 3. 2 経済性に着目した検討

浮体橋と従来橋との概算工費の比較検討を実施し、経済性の観点から適用性の評価を行う。比較検討を行う橋梁は、表-5に示すとおりである。検討は、3ケースの水深(20、40、60m)を設定して行った。経済性の比較を行った結果を図-18に示す。同図から水深20m以上の地域において、下部構造を有する一般的な橋梁に比べ浮体橋が経済的となりコスト削減の可能性がわかった。

表-5 従来橋と浮体橋の橋梁諸元

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

* 水深に応じて橋脚高が変わる

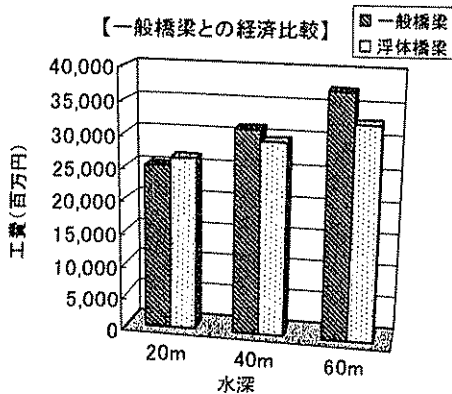


図-18 経済性の比較

4. まとめ

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 精度の高い動揺量推定手法として係留系の非線形復元力特性と、周波数依存性を有する流体力を考慮した時刻歴応答解析プログラムを開発した。また、作用外力として、波と風荷重がそれぞれ単独、もしくは同時に作用した場合の動揺量を解析できるものとした。
- (2) 水槽模型実験より、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と一致する時に浮体橋全体の応答変位が大きくなることが確認された。
- (3) 本研究で開発した時刻歴応答解析プログラムを使用して、浮体橋に波のみを作用させた場合の実験結果に対する解析を行った。その結果、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概ね一致しており、同プログラムの妥当性が確認された。
- (4) 動揺量に着目した浮体橋の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観点から検討を行った。その結果、太平洋沿岸および瀬戸内海の7地点において、車両走行制限相当の許容加速度であるノルウェー基準値 ($0.6m/s^2$) を満足することが確認された。

5. 今後の課題

以下に、浮体橋特有の波浪による動揺に対する設計に関して、今後の課題をまとめる。

- (1) 開発したプログラムは係留形式としてカテナリー係留を対象としているが、実用化に向けては以下に示す事項への対応が重要である。
 - ・ TLP 係留やドルフィン係留などの他の係留形式への拡張
 - ・ 連続ポンツーンなどの他の浮体構造への拡張
 - ・ 波浪の位相差や入射角に対する自由度
 - ・ 風の入射角に対する自由度
- (2) 本研究では、車両走行性の観点から適用性の検討を行ったが、構造安全性についても以下に示す事項を確認する必要がある。
 - ・ 漂流に対する安全性 (係留系の構造安全性)
 - ・ 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)
 - ・ 津波時のポンツーンの安定性
 - ・ 地震の影響

<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) 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
- 3) 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
- 4) 永井紀彦，菅原一晃，橋本典明，浅井正：全国港湾波浪観測20か年統計(1970-1989)，港湾技研資料 No744 Mar. 1993
- 5) 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