

# 浮体橋梁の波浪に対する弾性応答解析法の開発

## Elastic Response Analysis Method for Floating Bridges in Waves

広島製作所 岡 俊 蔵\*<sup>1</sup>  
 技術本部 熊 本 直 樹\*<sup>2</sup> 井 上 幸 一\*<sup>3</sup>  
 池 上 国 広\*<sup>4</sup>  
 防衛大学校 瀬 戸 秀 幸\*<sup>5</sup>  
 鳥取大学 上 田 茂\*<sup>6</sup>  
 大阪市 丸 山 忠 明\*<sup>7</sup>

従来浮体構造物の波浪に対する応答は、構造を剛体として求めていたが、浮体橋のようにスレンダーな構造の場合にはもはやその仮定は成立せず、構造の弾性影響を受ける。そこで、浮体橋の設計に供するため、構造の弾性を考慮した応答解析法を開発した。この解析法は、構造は有限要素法、流体は境界要素法で定式化し両者を連成したものである。弾性模型を用いた水槽実験により、この解析法は実験結果を良く表しており、妥当性が確認された。また、この解析法を用いた計算結果では構造の弾性を無視した場合には危険側の評価となっており、浮体橋の解析においては弾性影響を適正に考慮しなければならないことが明らかになった。

Floating structures are generally evaluated assumed to be rigid. A slender structure such as a floating bridge, however, has elasticity that must be accounted for. We developed analysis method that takes structural elasticity into account. The structure, formulated by finite element method (FEM), and fluid, formulated by boundary element method (BEM), interact. An elastic model test in water tank showed that analysis evaluated the influence of structural elasticity properly, confirming the validity of elastic response analysis. A numerical example using this method emphasizes the need to consider the influence of structural elasticity on the dynamic response of the floating bridge to waves.

### 1. ま え が き

浮体橋梁は、米国やノルウェーなどで既に道路橋として供用されており、また我が国でも大阪市臨海部の交通アクセスとして旋回式浮体橋“夢洲～舞洲連絡橋（仮称）”の工事が進められている。これら浮体橋梁は、大水深域や軟弱地盤層が厚い場所で有力な橋梁形式と考えられているが、暴風時の風や波浪の影響を強く受けることは避けられない。したがって、浮体橋梁の安全性を確保するためには、風や波浪に対する動的応答を明確にする必要がある。

従来、浮体構造物の波浪応答は、浮体を剛体と仮定して算定されている。ところが浮体橋梁のようなフレキシブルな構造体の場合は、もはや剛体という仮定は成立せず、波浪応答に構造の弾性の影響が現れてくると考えられ、その点を考慮した解析法が必要となってくる。

本報は、浮体橋梁の設計に供するために開発した構造弾性を考慮した波浪応答解析法を示し、大型弾性模型を用いた水槽実験によるその検証結果について報告する。

### 2. 浮体橋梁の概要

我が国では、本格的な浮体橋の実績が過去にないため、初めに浮体橋の概要について述べる<sup>(1)</sup>。

浮体橋梁の形式は、図1に示すように連続式浮体橋梁と分離浮体式浮体橋梁とに大別される。前者には、米国の Washington 湖橋や Hood Canal 橋などが例として挙げられ、PC (Prestressed Concrete) 製が主である。後者には、ノルウェーの Bergsøysund 橋や Nordhordland 橋があり、いずれもポンツーンは PC 製であるが上部工は鋼トラス橋あるいは鋼箱桁（けた）橋である。

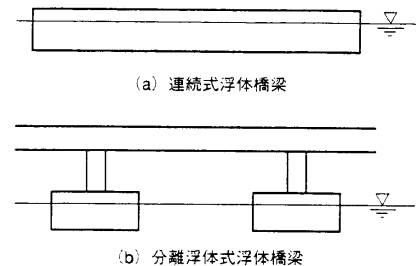


図1 浮体橋梁の形式 連続式と分離浮体式の2種類に大別される。  
Structural types of floating bridges

両浮体橋形式にはそれぞれ一長一短があるが、環境への影響や航路の障害などの点で連続式浮体橋梁の適用地点はある程度限定されるものと考えられる。

現在建設中の夢洲～舞洲連絡橋（仮称）は、図2に示すようにアーチ橋を2基の鋼ポンツーンで支持し、端部をドルフィン係留したものであり、非常時には浮体橋全体を旋回させて航路開放するという従来に例のない形式のものである。

### 3. 弾性応答解析

#### 3.1 解析法

波浪に対する弾性応答解析法<sup>(2)</sup>の概要を、図3に示す。

構造は三次元弾性骨組としてモデル化し、有限要素法を用いて定式化する。ポンツーンは剛体として取扱い、流体の影響を考慮するためポンツーンの重心に節点を取る。

一方、流体は非粘性かつ非圧縮性を仮定して三次元ポテンシャル流としてモデル化する。そして、ポンツーンの没水表面を要素分割し、その上に波吹出しを分布させて自由表面を持つ流れ場

\*1 鉄構技術部橋梁設計課  
 \*2 広島研究所鉄構・土木研究室長 工博  
 \*3 広島研究所鉄構・土木研究室主務  
 \*4 長崎研究所主管 工博  
 \*5 機械システム工学科教授 工博  
 \*6 工学部土木工学科教授 工博  
 \*7 建設局土木技術部主幹

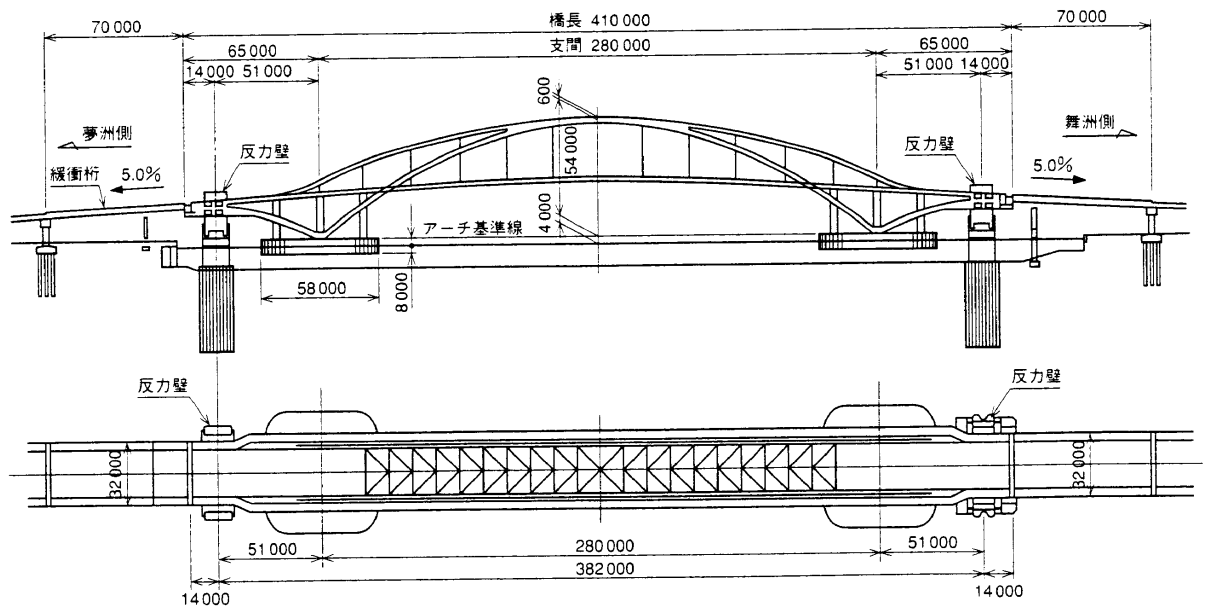


図2 夢洲～舞洲連絡橋(仮称) 我が国初の本格的な浮体橋梁, 旋回により航路開放可能である.  
Plan and elevation views of Yumesima~Maisima bridge

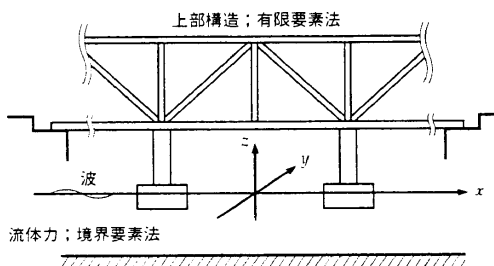


図3 解析法概要 有限要素法でモデル化した構造と境界要素法でモデル化した流体とを連成させる.  
Outline of analysis method

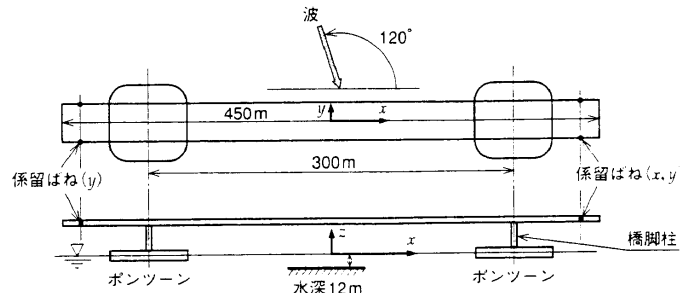


図4 解析モデル 弾性変形が顕著に現れるように実機よりも剛性を低下させている.  
Analytical model of floating bridge

を表示する境界要素法により定式化する. 以上により, 定式化した構造と流体を連成させた運動方程式は以下ようになる.

$$([M_s] + [M_H])\{\ddot{x}\} + ([C_s] + [C_H])\{\dot{x}\} + ([K_s] + [K_H] + [K_M])\{x\} = \{f\} \quad (1)$$

ここに,

- [M<sub>s</sub>] : 構造物の質量行列 (流体の影響のない状態)
- [M<sub>H</sub>] : 流体による付加質量行列
- [C<sub>s</sub>] : 構造物の減衰行列 (流体の影響のない状態)
- [C<sub>H</sub>] : 造波減衰行列
- [K<sub>s</sub>] : 構造物の剛性行列 (流体の影響のない状態)
- [K<sub>H</sub>] : 浮力復原力を表す行列
- [K<sub>M</sub>] : 係留系を表す行列
- {x} : 節点変位ベクトル
- {f} : 波強制力ベクトル

この運動方程式において, 流体による付加質量, 造波減衰及び波強制力は周波数の関数である. 規則的な周波数応答を考えると, 応答は比較的容易に求まる. すなわち, ω を周波数として節点変位及び波強制力をそれぞれ式(2)とおくと, 運動方程式(1)は式(3)となり, 節点変位{x}が求まる.

$$\{x\} = \{X\}e^{i\omega t}, \{f\} = \{F\}e^{i\omega t} \quad (2)$$

$$([K_s] + [K_H] - [K_M]) + i\omega([C_s] + [C_H]) - \omega^2([M_s] - [M_H])\{X\} = \{F\} \quad (3)$$

さらに, 不規則波に対する応答は, 適当な波スペクトルを用いて線形重ね合せにより評価することができる.

表1 主要モードの固有周期  
Natural periods of principal vibration modes (単位: s)

固有振動モード	弾性体モデル	剛体モデル
ヒープ	11.0	11.0
ピッチ	10.9	10.9
ロール	10.2	10.2
サージ	5.6	5.6
ねじれ	5.2	—
スウェイ	4.5	3.7
ヨー	2.6	2.7

### 3.2 数値解析例

図4に示すような2基のポンツーンに支持された浮体橋梁について検討する.

#### 3.2.1 振動特性

表1に, 構造体を弾性とした場合と剛体とした場合の主要な振動モードの固有周期を示す. 弾性体モデルと剛体モデルの振動特性の相違点で最も大きいものは, 剛体モデルにはねじれモードがないのに対し, 弾性体モデルには存在することである. 桁が剛体であれば, 2つのポンツーンが逆相で運動し得ないからである.

スウェイに関して, 弾性体モデルの固有周期が剛体モデルのそれより長くなっているが, その他のモードに関してはほとんど差

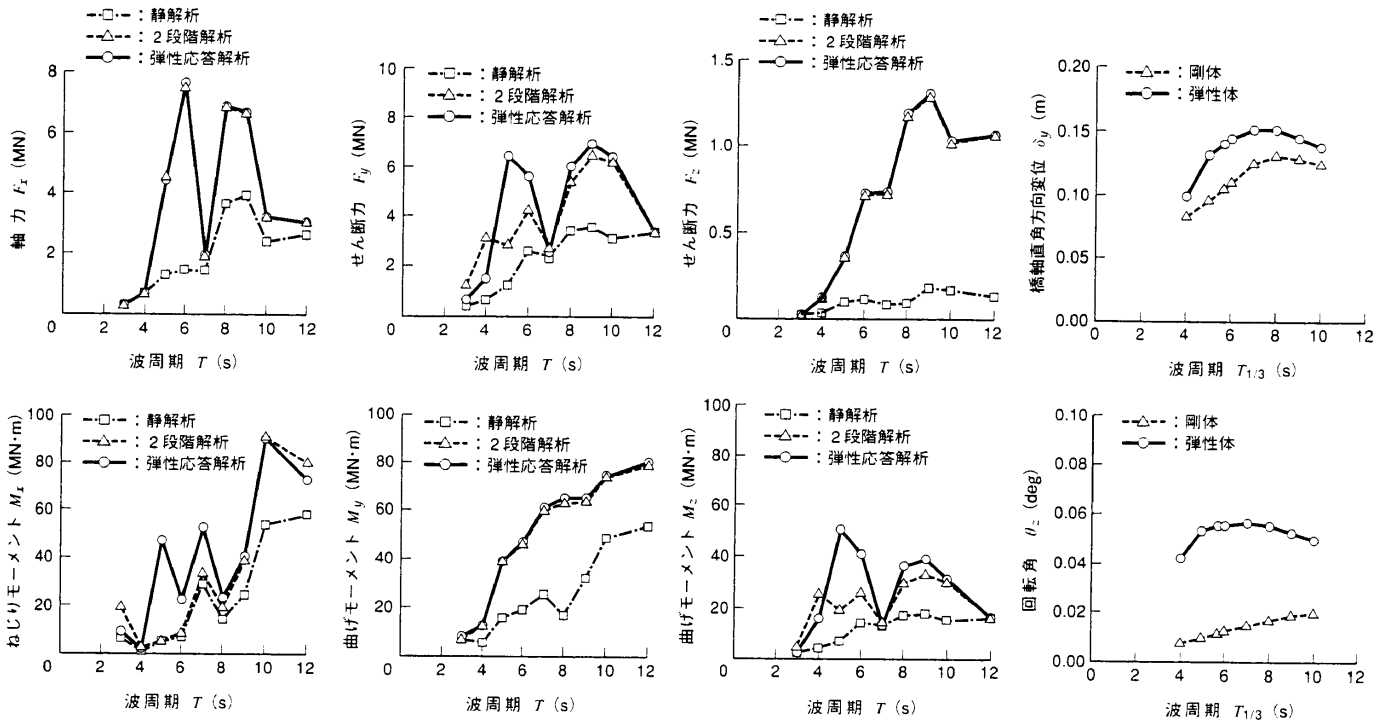


図5 波浪応答解析結果 従来の解析法と比較して応答解析結果を示す。  
Results of response analysis

が生じていない。

3. 2. 2 応答解析結果

前述の弾性応答解析法を用いた規則波応答解析結果を図5に示す。比較のためポンツーンの位相を考慮して、波強制力のみを静的に作用させた静解析並びに剛体モデルから算出した運動に基づく慣性力を静的に弾性モデルに作用させる2段階解析の結果も併せて示す。波は波高2 mの規則波で、橋軸から120°の角度で入射するものとする。

まず、部材力応答について見ると、静解析の結果は、他の2種類の解析結果よりも小さくなっていることが分かる。これは、構造の運動に伴う力を無視していることに起因する。また、2段階解析と弾性応答解析とを比較すると、軸力  $F_x$ 、せん断力  $F_y$ 、曲げモーメント  $M_x$ 、曲げモーメント  $M_y$  は同等であるのに対し、せん断力  $F_y$ 、ねじりモーメント  $M_x$ 、曲げモーメント  $M_z$  の差が大きくなっており、2段階解析法は、危険側の評価となっている。この差が桁の弾性変形の影響によるもので、固有周期に差が生じていたねじりとスウェーイのモードに対応している。

次に、不規則波浪中の係留点の変位を、弾性体モデルと剛体モデルとで比較する。不規則波の条件は、有義波周期  $T_{1/3}=5.7$  s、有義波高  $H_{1/3}=1.4$  m とし、Bretschneider—光易型スペクトルを用いた。係留点の Y 方向変位  $\delta_y$  と Z 軸回りの回転各  $\theta_z$  (いずれも 1/1 000 期待値) と有義波周期の関係を図5に示す。

浮体橋の剛体運動の影響が大きいと考えられがちな係留点の変位に関しても、弾性影響による差が顕著に現れており、剛体モデルは過小評価となっている。係留システムの検討においても弾性モデルを用いる必要がある。

4. 検証実験

4. 1 実験概要

前述の弾性応答解析法を検証することを目的として、弾性模型を用いた水槽実験を実施した<sup>13)</sup>。

4. 1. 1 水槽

使用水槽は、当社長崎研究所の耐航性能水槽 (長さ 160×幅 30×水深 3.5 m) で、水深や水路の影響を調べるため水路底や導波板を設置した。

4. 1. 2 実験供試体

実験供試体は、図6に示すような2基のポンツーンで支持されたアルミ製弾性梁の両端をコイルばねで係留した浮体橋模型とした。この実験供試体は、現在工事中の夢洲～舞洲連絡橋 (仮称) をモデルに幾何学的縮尺 1/40 としたものであり、質量分布がほぼ同等になるようにバランスウェイトを設置してあるが、実橋よりも弾性影響がより顕著に現れるように弾性梁の橋軸直角方向曲げ剛性とねじり剛性を低くしてある。

4. 1. 3 実験条件

応答に影響を与えようと考えられる要因を考慮し、水深、係留ばね剛性、波方向、波高など条件を変えた多数の実験を実施した。

入力波は規則波及び不規則波とし、不規則波のスペクトル特性は Bretschneider—光易型とした。なお、以下に示す数値は、すべて実機換算での値である。

4. 2 実験結果

実験結果と前述の弾性応答解析法を用いた結果とを比較する。実験は、上述のように多くのケースについて実施しているが、一例として波向 108°、深水深のケースについての結果を桁位置での水平変位と上下変位の規則波応答と不規則波応答として、図7に示す。この図において、横軸は実機スケールでの波周期 (不規則波については有義波周期) を示し、矢印は振動モード (スウェーイあるいはヒープ、ピッチ) の周期を示している。縦軸は、単位波高当りの応答変位を表している。

規則波応答実験結果では、動揺の固有周期において明りょうな応答のピークが生じているが、不規則波応答実験では全体的にならされて明りょうなピークが見られなくなっていることが分かる。また、固有周期付近では、水平方向変位に関しては、桁中央部の

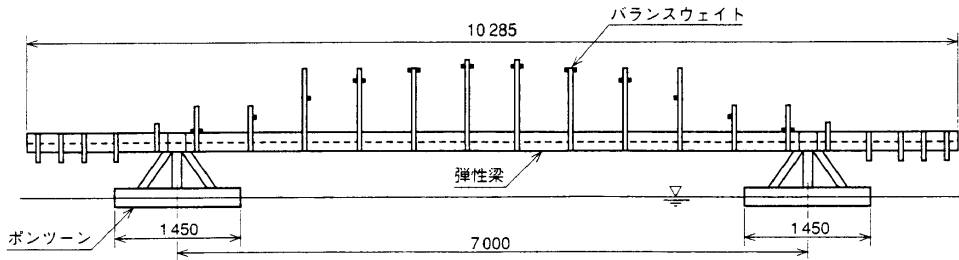


図6 実験供試体 弾性梁を2基のポンツーンで支持した浮体橋モデル、実機の1/40に相当する。  
Test model of floating bridge

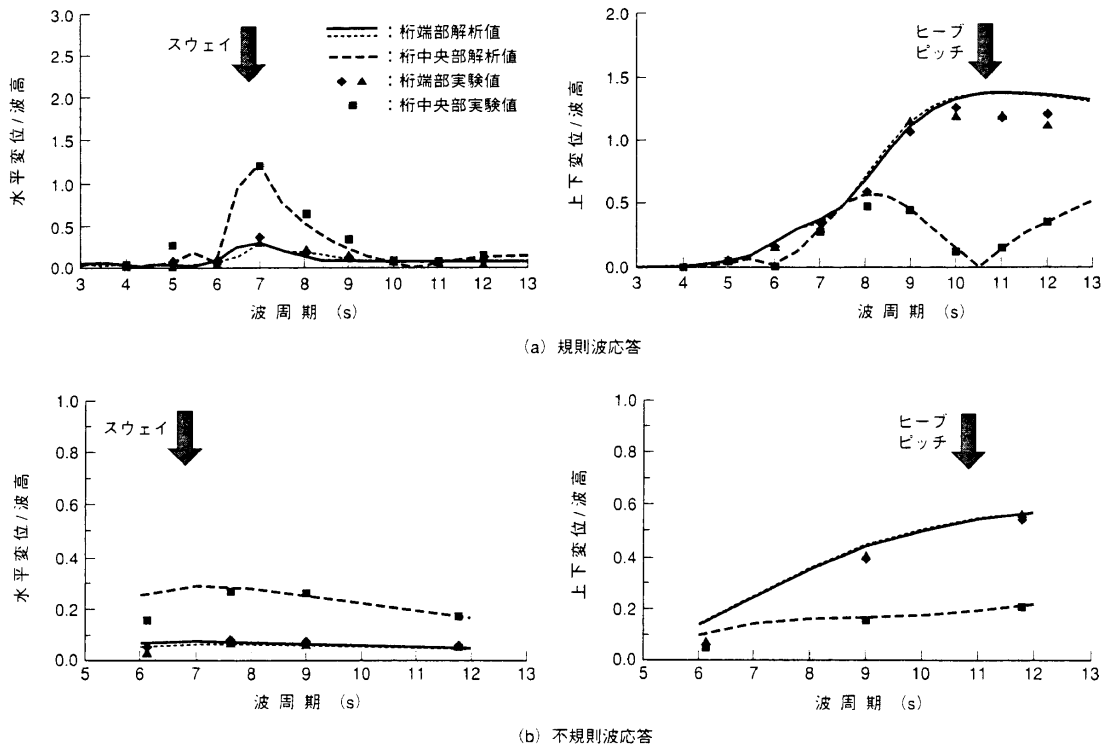


図7 波浪応答実験結果 規則波応答では明りょうなピークが見られるが、不規則波応答ではそれがならされている。  
Results of response test

応答が桁端部の応答よりも大きくなっているが、これは桁の弾性変形の影響が強く現れていることを示している。一方、上下変位に関しては桁中央部変位が小さく、両端で大きくなっているが、これは斜めからの波入射のため、2つのポンツーンが同相で運動するヒープよりも逆相で運動するピッチが支配的となっていることを示している。

また、不規則波応答は、実際の波に対する応答に相当すると考えられるが、夢洲～舞洲連絡橋（仮称）の設計波周期（7.7s）において波高に対する変位の比が水平方向、上下方向共に0.3程度となっている。

弾性応答解析は、上記のような弾性影響が強く現れている状況や2つのモードが連成している状況などを精度良く表現している。

他の実験条件においても同様に、弾性応答解析は実験結果を良く表していることが確認され、弾性応答解析法の妥当性が検証された。

### 5. む す び

浮体橋の弾性影響を考慮した波浪応答解析法を開発し、それを実験的に検証した。また、この解析法を用いた計算結果から、構

造の弾性を考慮しない場合には危険側の評価となる可能性が高く、浮体橋の波浪応答解析においては弾性影響を適正に考慮すべきことが明らかになった。

既に本解析法は、夢洲～舞洲連絡橋（仮称）の設計断面力算出など、設計実務に供している<sup>(4)</sup>。本解析法により、従来解析法に比べ精度の向上はもちろん、作業の効率化も可能となった。

本報では周波数領域での解法を示したが、浮体橋のより詳細な挙動解明にも対応するため各種非線形要素が取扱える時刻歴応答解析法に拡張、整備している。これら解析技術や実験技術により、これからは我が国の浮体橋の発展に寄与していきたいと考えている。

### 参 考 文 献

- (1) 渡邊英一, 浮橋・水中トンネル建設の動向, 海峡横断 Vol.9 (1997) p.11
- (2) 上田ほか, 浮体橋梁の弾性応答解析法に関する研究, 土木学会海洋開発論文集 Vol.13 (1997) p.219
- (3) 池上ほか, 旋回式浮体橋の波浪中弾性応答水槽実験, 第14回海洋工学シンポジウム論文集 (1998)
- (4) 丸山ほか, 夢洲～舞洲連絡橋（仮称）の計画と設計（上）, 橋梁と基礎 Vol.32 No.2 (1998)