

浮体橋梁の弾性応答解析法に関する研究

Study on the Elastic Response Analysis for Floating Bridges against Waves

上田 茂*, 瀬戸秀幸**, 熊本直樹***, 井上幸一***, 岡 俊蔵****

Shigeru UEDA, Hideyuki SETO, Naoki KUMAMOTO, Koichi INOUE and Shunzo OKA

In general, the motions and mooring forces of floating structure are evaluated on the assumption that the structure is rigid. But, on a slender structure, such as a floating bridge, the effect of its elasticity can be neglected no longer.

This paper describes the computational analysis method to calculate motions, mooring forces, deformations and working stresses of floating bridge. As the results of the calculation for a model bridge by several methods, one is our analytical method and others are conventional ones, it is proved that the effect of structural elasticity must be taken into account properly.

Keywords : floating bridge, response analysis, elasticity, wave, motion, mooring force

1. はじめに

米国、ノルウェー等において既に道路橋として供用されている浮体橋梁は、大水深域あるいは軟弱地盤層が厚い場所の有力な橋梁形式のひとつとして国内でも着目されている。これらの外国の供用中の浮体橋梁は、湖やフィヨルド内などの風、波等が比較的穏やかな地点に設置されているが、国内では台風時の波浪など、自然条件が外国の設置場所よりもはるかに厳しい。したがって、この浮体橋梁の安全性を確保するためには、暴風時の風および波に対する動的応答を明確にする必要がある。

一般に、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スレンダーな構造物の場合は、もはや剛体という仮定は成立せず、波浪応答値に弾性変形の影響が表れる。

この論文では、構造物の弾性を考慮した解析法を説明するとともに、その解析法を用いて算定した部材力や係留力と構造物の弾性を考慮しないときの解析値と比較して、波浪中の浮体橋梁の部材力、応力および係留力算定手法について考察する。

2. 波浪中弾性応答解析法

波浪中弾性応答解析手法を、図1に示す。

構造側は3次元弾性骨組構造としてモデル化し、有限要素法を用いて定式化した。ポンツーンは剛体として取り扱い、流体からの寄与を取り組むため、ポンツーン部の重心に節点をとる。

流体側は3次元ポテンシャル流としてモデル化し、ポンツーンの没水部表面を要素に分割し、その上に波吹き出しを分布させて自由表面をもつ流れ場を表示する境界要素法により定式化した。

以上を用いて連成解析方程式を解いて節点変位の変動成分を求め、その節点変位の変動成分から断面力や応力の変動成分を算定する。

以上から分かるように、構造物は3次元立体弾性骨組構造としてモデル化するので、実構造物の部材力、応力算定は通常の構造解析と同様の手法で行うことができ、実用性が高く、既にこの解析手法は節点数が多い実浮体橋梁の構造解析に使用している。

解析手順を図2に示す。解析システムは一つの大きなプログラムではなく、機能毎の複数のプログラムから成っており、ファイルのやりとりで解析を進める。

本解析の主要部である3次元流体力解析および連成解析方法を具体的に示すと、以下のとおりである。

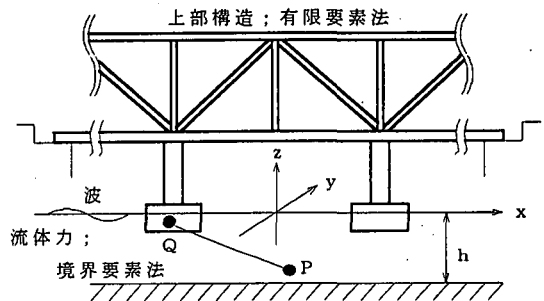


図1 波浪中弾性応答解析手法

* 正会員 鳥取大学工学部土木工学科 (〒680 鳥取市湖山町南4丁目101)

** 三菱重工業㈱長崎研究所

*** 正会員 三菱重工業㈱広島研究所

**** 正会員 夢洲・舞洲連絡橋JV

(1) 3次元流体力解析法

3次元の任意形状浮体が、水深 h の水域の波浪中で6自由度方向に定常周期運動をしているものとする。

浮体の没水面 S 上の点 $Q \equiv (\xi, \eta, \zeta)$ における j モードに対応する吹出し分布の強さを $\sigma_j(Q)$ とすると、流体中の1点 $P \equiv (x, y, z)$ における速度ポテンシャル $\phi_j(P)$ は、式(1)で表される。($j=1$: surge, $j=2$: sway, $j=3$: heave, $j=4$: roll, $j=5$: pitch, $j=6$: yaw)

$$\phi_j(P) = \int_S \sigma_j(Q) G(P, Q) dS_Q \quad (1)$$

ただし、 $G(P, Q)$ は点 Q におかれた単位の周期的な吹出しによる点 P における速度ポテンシャル (グリーン関数) で、式(2)が知られている。

$$G(P, Q) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + \int_0^\infty \frac{2(\kappa + K)e^{-\kappa h} \cosh \kappa(\zeta + h) \cosh \kappa(z + h)}{\kappa \sinh \kappa h - K \cosh \kappa h} J_0(\kappa R) d\kappa \\ - i \frac{2\pi \kappa_0^2}{h(\kappa_0^2 - K^2) + K} \frac{\cosh \kappa_0(\zeta + h) \cosh \kappa_0(z + h)}{\cosh \kappa_0 h} J_0(\kappa_0 R) \quad (2)$$

となる。ここに

$$R = [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]^{1/2} \quad r = [R^2 + (z - \zeta)^2]^{1/2} \quad r_1^* = [R^2 + (z + \zeta)^2]^{1/2} \\ i; \text{虚数単位} \quad J_0; \text{第0種ベッセル関数} \quad (3)$$

であり、 κ_0 は式(4)の根である。

$$\kappa_0 \tanh \kappa_0 h = K = \omega^2 / g \quad (\omega; \text{波の円振動数}, g; \text{重力単位}) \quad (4)$$

一方、未知の吹出し分布 $\sigma_j(Q)$ は、式(5)の積分方程式を解いて決定される。

$$-4\pi E(P)\sigma_j(P) + \int_S \sigma_j(Q) \frac{\partial}{\partial n} G(P, Q) dS_Q = v_n \quad (5)$$

ここで、 $E(P) = 1$ (P : 流体内部), $= 1/2$ (P : 流体境界上), $= 0$ (P : 流体外部), v_n ; 流速式(1)から速度ポテンシャル ϕ_j を決定すると、付加質量 M_{Ajk} 及び造波減衰 B_{Ajk} は式(6)から求められる。

$$M_{Ajk} + i \frac{B_{Ajk}}{\omega} = \rho \int_S \phi_j \frac{\partial \phi_k}{\partial n} dS \quad (\rho; \text{流体の密度}) \quad (6)$$

なお、波強制力 E_k は式(7)である。

$$E_k = \rho g \zeta_0 \int_S (\phi_0 + \phi_7) \frac{\partial \phi_k}{\partial n} dS \quad (\phi_0; \text{入射波ポテンシャル}, \phi_7; \text{散乱波ポテンシャル}, \zeta_0; \text{入射波振幅}) \quad (7)$$

(2) 連成解析法

連成解析の方程式は式(8)である。

$$([M] + [M_A])\{\ddot{D}\} + ([B] + [B_A] + [B_D])\{\dot{D}\} + ([S] + [S_A] + [S_B])\{D\} = \{E\} \quad (8)$$

ここで $[M]$; 質量行列 (dry状態), $[M_A]$; 付加質量行列, $[B]$; 減衰行列 (dry状態)

$[B_A]$; 造波減衰行列, $[S]$; 剛性行列 (dry状態), $[B_D]$; 等価造渦減衰行列

$\{D\}$; 節点変位, $[S_A]$; 浮力復原行列, $\{E\}$; 波強制力ベクトル, $[S_B]$; 線形バネ行列

規則的な定常周期応答を考えると、直接法の適用が可能である。すなわち、節点変位及び波強制力はそれぞれ

$$\{D\} = \{\hat{D}\} e^{i\omega t} \quad \{E\} = \{\hat{E}\} e^{i\omega t} \quad (9)$$

とおくことができ、連成解析方程式

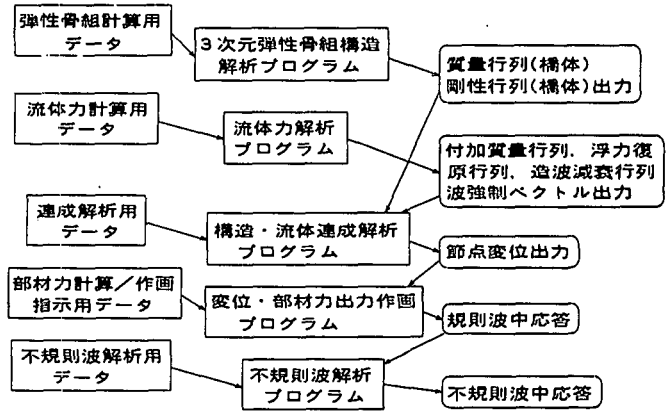


図2 解析手順

$$([S] + [S_A] + [S_B] + i\omega([B] + [B_A] + [B_D]) - \omega^2([M] + [M_A]))\{\hat{D}\} = \{\hat{E}\} \quad (10)$$

を解いて、節点変位の変動成分を求めることができる。この節点変位の変動成分から、断面力および応力の変動成分を算定する。

なお、不規則波中の応答は、適切な波スペクトルを用いて、線形重ね合わせ法により算定する。

3. 解析モデル

図3に示す2個のポンツーンに支持された弾性梁に、波が橋軸から120度の角度で入射するときの波浪応答を検討する。このモデル構造は、ポンツーンA側は橋軸直角方向のみ、ポンツーンB側は橋軸方向および橋軸直角方向に、バネ定数4000tf/mのバネで係留されている。梁の長さは450m、支間は300mで、水深は12mである。両桁端には渡橋のマスが付加した。

以下では、橋軸方向にx軸を、橋軸直角方向にy軸を鉛直方向にz軸をとる。

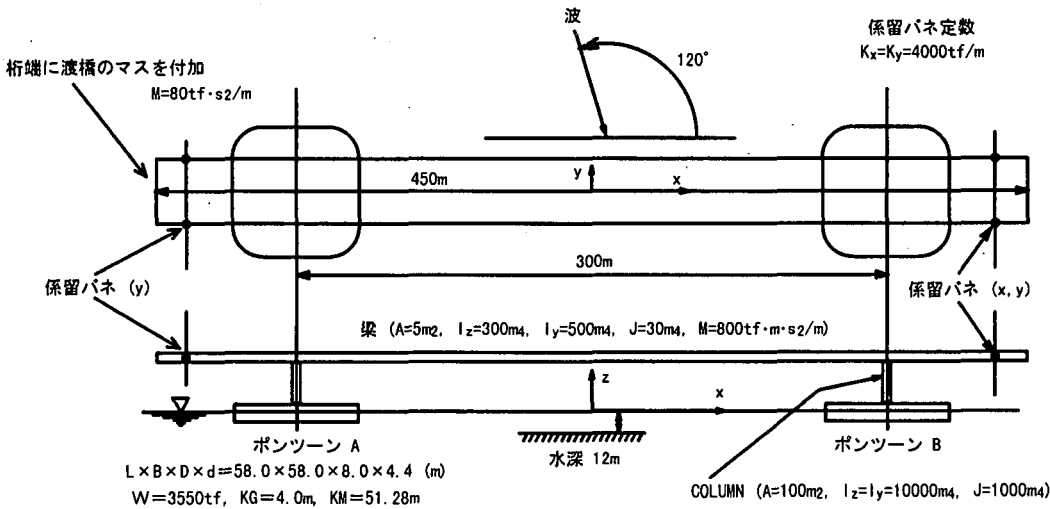


図3 解析モデル

4. 振動特性

表1に、構造体を弾性としたときと剛体としたときの、主要な振動モードの固有周期を示す。剛体モデルと弾性体モデルの振動特性の相違点は以下のとおりである。

最も大きな相違点は、剛体モデルにはねじれモードの振動が無いのに対し、弾性体モデルでは存在することであり、第2の相違点は、弾性体モデルのスウェイ（左右動）の固有周期が剛体モデルのそれよりも長周期側へ移動することである。

ヒープ、ピッチ、ロール、サージに関してはほとんど差がない。

表1 主要モードと固有周期（単位：秒）

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

5. 部材力応答

5.1 解析方法

図4に示すように、ポンツーンに位相を考慮して波強制力のみを作用させた静解析、剛体運動を求めてその運動から求めた節点力を静的に作用させる2段階解析法、および、2.で説明した構造体の弾性を考慮した解析法（弾性応答解析法）の、3種類の解析法で求めた部材力応答値を比較する。

波強制力のみを作用させる解析法では、浮体が運動する影響は考慮できない。2段階解析法、すなわち、剛体運動を求めてその運動をもとに部材力を算定する方法は、従来から海洋構造物の設計に使用されていた方法であり、構造体を剛体と見なしたときの運動の影響は考慮できる。しかし、構造体を剛体と見なせない場合は部材力を正しく評価できない。

これに対し、2.で述べた弾性応答解析法では、1段階の計算で、しかも、構造体の弾性の影響も入った部材

力応答を求めることができる。

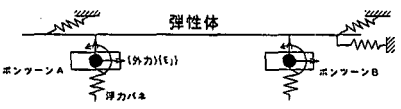
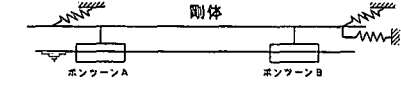
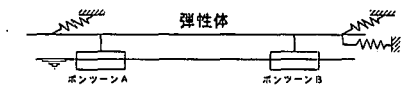
従 来 の 解 析 法	静 解 析	波強制力 $\{E_i\}$ を外力とした静解析 	第1段階：波強制力 $\{E_i\}$ を算定 第2段階： $[C][S_2]+[S_{A1}]]\{D_i\}=\{E_i\}$ $[S_2]$ ：剛性マトリックス（弾性体） $[S_{A1}]$ ：浮力バネ $\{D_i\}$ ：変位ベクトル $\{E_i\}$ ：波強制力
	2 段 階 解 析 法	第1段階：波強制力 $\{E_i\}$ 、付加質量 $[M_{A1}]$ 、造波減衰 $[B_{A1}]$ を算定 → 剛体運動を解いて $\{\ddot{D}_i\}$ を算定  第2段階：第1段階で求めた加速度、速度、変位を用いて静解析	第1段階：剛体運動を解いて $\{\ddot{D}_i\}$ を算定 $[C][M]+[C][M_{A1}]]\{\ddot{D}_i\}+[C][B_{A1}]]\{\ddot{D}_i\}+[C][S_2]+[S_{A1}]]\{D_i\}=\{E_i\}$ $[S_2]$ ：剛性マトリックス（剛体） 第2段階：静解析（外力は下式右边） $[C][S_2]+[S_{A1}]]\{D_i\}=\{E_i\}-[C][M]+[C][M_{A1}]]\{\ddot{D}_i\}-[C][B_{A1}]]\{\ddot{D}_i\}-[S_{A1}]]\{D_i\}$ $[S_2]$ ：剛性マトリックス（弾性体） $[S_{A1}]$ ：仮想バネ
	弾性 応 答 解 析 法	第1段階：波強制力 $\{E_i\}$ 、付加質量 $[M_{A1}]$ 、造波減衰 $[B_{A1}]$ を算定 → 弾性応答 $\{D_i\}$ を算定 	第1段階のみ： $[C][M]+[C][M_{A1}]]\{\ddot{D}_i\}+[C][B_{A1}]]\{\ddot{D}_i\}+[C][S_2]+[S_{A1}]]\{D_i\}=\{E_i\}$ $[M]$ ：上部工+ポンツーン質量マトリックス $[M_{A1}]$ ：ポンツーン付加質量マトリックス $[B_{A1}]$ ：造波減衰 $[S_2]$ ：剛性マトリックス（弾性体） $[S_{A1}]$ ：浮力バネ $\{E_i\}$ ：波強制力 $\{D_i\}$ ：変位ベクトル

図 4 比較する 3 種類の解析法

5.2 部材力応答

図 5 に 3 種類の解析法で算定した規則波中の 6 成分の部材力（軸力、せん断力、 x 、 y 、 z 軸周りのモーメント）を示す。図示している部材力は単位波振幅（1m、波高 2m）当たりの梁の最大部材力である。図の横軸は波周期で、0.5 秒刻みで計算した。図の 3 種類の記号、すなわち○は弾性応答解析法の、△は 2 段階解析法の、□は波強制力のみを作用させた静解析の解析結果を示している。これらの図から以下が分かる。

波強制力のみを作用させた静解析による部材力は、他の 2 種類の解析による部材力よりも小さい。これは、浮体橋梁の波浪応答解析において、運動の影響を考慮する必要があることを示している。

2 段階解析法と弾性応答解析法を比較すると、軸力、せん断力 F_z 、曲げモーメント M_y はほぼ同等であるが、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 は異なっている。この違いは弾性応答解析では梁がねじれたり橋軸直角方向へたわんだりしながら構造体が運動しているのに対し、2 段階設計法では剛体運動を仮定しているためにそのような変形の影響が含まれていないためである。

弾性応答解析結果の、ねじりモーメントの波周期 5 秒のピークおよび曲げモーメント M_x の波周期 5 秒のピークは、計算を 1 秒刻みで行っているために表 1 に示すねじれ及びスウェイの固有周期とは完全には一致していないが、共振現象である。この共振点における 2 段階解析法と弾性応答解析法による部材力の差は大きく、従来の 2 段階解析法では部材力を過小評価する。

3 種類の解析法ともに波周期 7 秒でねじりモーメントのピークがあるが、これは左右のポンツーンに入射する波の位相差に起因する。

5. 係留力

弾性体モデルと剛体モデルの係留力を比較するために、不規則波浪中応答解析を行った。解析では最初に規則波応答を計算し、その結果を用いて不規則波応答を算出した。波浪条件は、 $T_{1/3}=5.7s$ 、 $H_{1/3}=1.4m$ 、 $H_{max}=2.7m$ 、波向=橋軸から 120° であり、Bretschneider-光易型スペクトルを用いた。

図 6 に、検討対象波周期以外も含めて、係留点の不規則波中の橋軸直角方向変位 δ_y と、 z 軸（鉛直軸）まわりの回転角 θ_z を示す。この計算位置は、図 3 においてポンツーン A 側の係留点である。図の横軸は平均波周期で、縦軸は δ_y および θ_z の $1/1000$ 期待値である。この係留点における弾性体モデルと剛体モデルの δ_y 、 θ_z 以外の変位および回転角は、ほぼ同じ値である。

図 6 から δ_y 、 θ_z ともに弾性体モデルの方が剛体モデルよりも大きいことが分かる。

δ_y に係留バネ定数を乗じたものが係留力であり、波浪条件 $T_{1/3}=5.7s$ では

弾性体モデル $F_y=560tf$

剛体モデル $F_y=420tf$

である。その差 $140tf$ が弾性影響である。

係留力を支配する外力は波浪荷重のみでなく、風荷重、潮流力なども影響するので、上記の $140tf$ という係留力の差が係留システムに与える影響度は検討条件によって異なる。波浪荷重の影響度が大きい構造物の係留シス

テムを検討する場合は、構造体の弾性影響を考慮した係留検討を行う必要がある。

また、1カ所の係留点に複数の係留材（防舷材）を使用する場合は、回転変形および傾斜があるために1個毎に圧縮量が異なるので、個別に係留材の安全性を検討する必要がある。

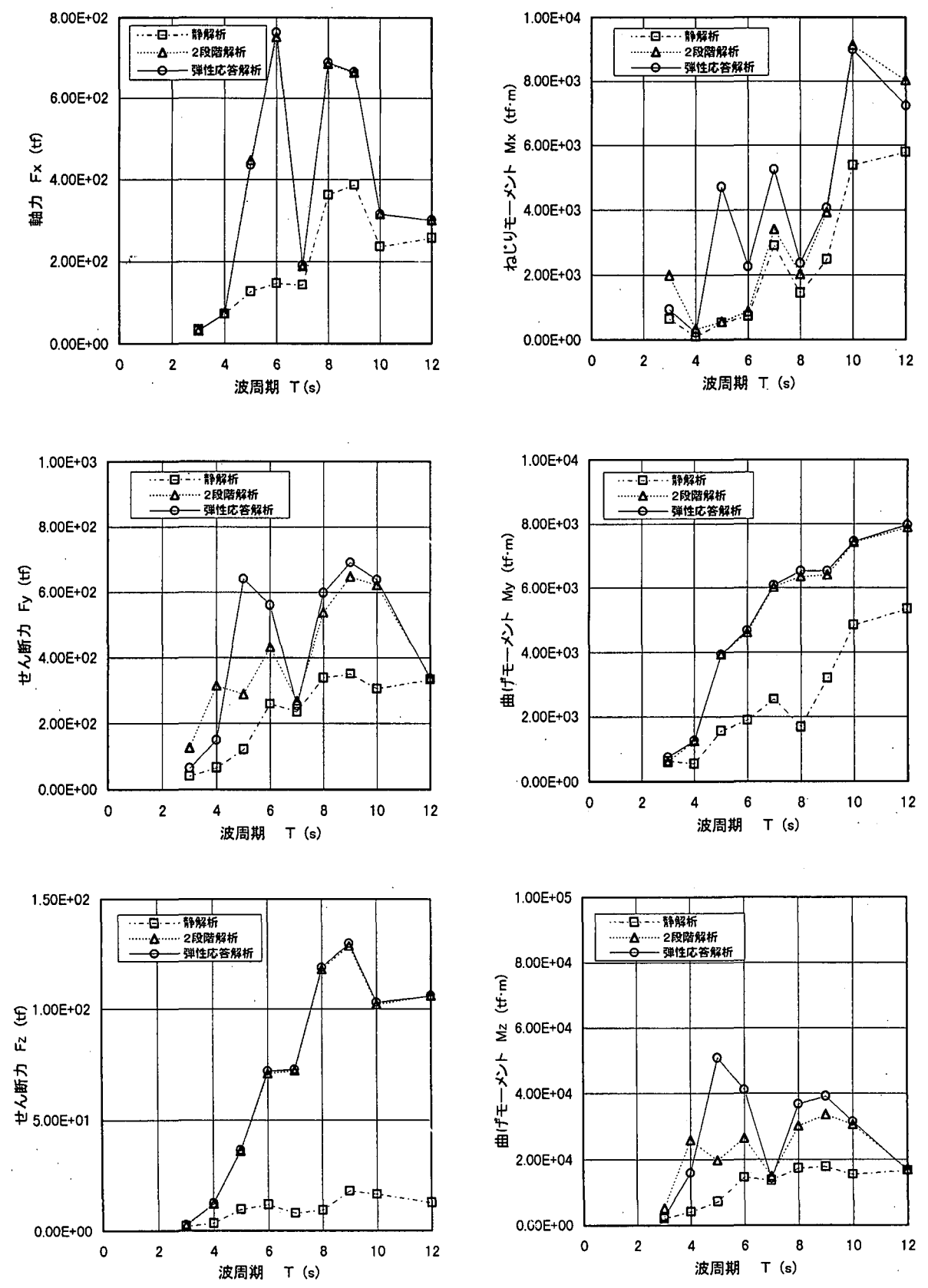


図 5 梁の最大部材力（規則波，波高 2m）

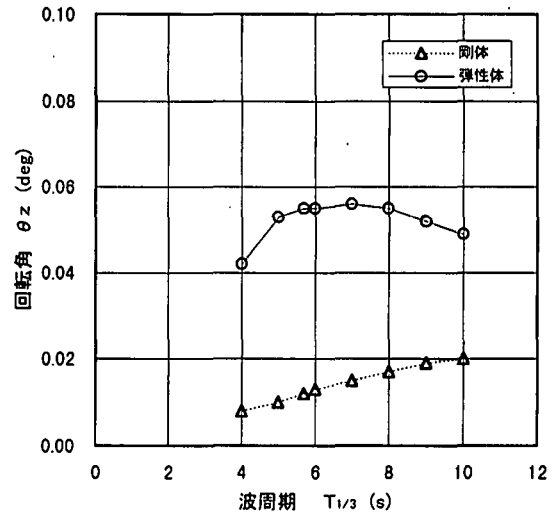
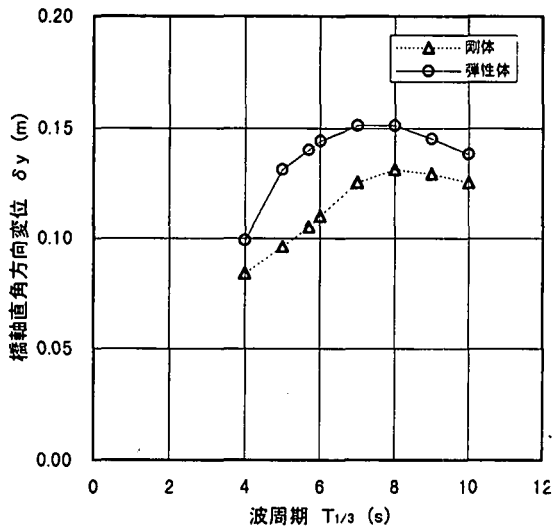


図6 係留点の橋軸直角方向変位 δy と鉛直軸周り回転角 θz (不規則波応答, 1/1000 期待値)

7. まとめ

この論文では、弾性体の波浪中応答解析法について説明するとともに、支間 300m の浮体橋梁の波浪中弾性応答解析および従来の解析法による解析を実施して、応答値への弾性影響について考察した。本論文の内容をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 採用した弾性応答解析法は、橋体は 3 次元弾性骨組構造としてモデル化して有限要素法で定式化し、流体側は 3 次元ポテンシャル流としてモデル化して境界要素法で定式化した。
- (2) 規則波中の応答を直接法を適用して求め、不規則波応答は波スペクトルを用いて線形重ね合わせ法により算定した。
- (3) 2 個のポンツーンで支持された支間 300m の浮体橋梁について、波強制力のみを作用させた静解析、剛体運動を求め、その剛体運動を節点力に換算した静解析 (2 段階解析法)、および弾性応答解析法の 3 種類の解析を実施したところ、①動的解析を行う必要があること、②弾性影響を考慮しないと部材力を過小評価する可能性があること、が明らかになった。
- (4) また、構造体を剛体と見なしたときと弾性体としたときの係留力についても比較し、剛体と見なすと波浪に起因する係留力を過小評価する可能性があること、などが判明した。

本論文で紹介した解析法は、多数の部材からなる浮体橋梁を通常の構造解析と同様の手順で実用的に解析することができ、既に実構造物の構造検討に使用している。

参 考 文 献

- 1) 上田茂, 岡俊蔵, 熊本直樹, 井上幸一, 瀬戸秀幸; 浮体橋梁の波浪中弾性応答解析, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集, I-A261, 1996.9
- 2) UEDA, S., H. SETO, N. KUMAMOTO, K. INOUE and S. OKA; Behavior of Floating Bridge under Wind and Wave Action, Proc. of International Workshop on Very Large Floating Structures, 1996
- 3) 上田茂, 井上幸一, 熊本直樹, 岡俊蔵, 瀬戸秀幸; 浮体橋梁の弾性応答解析による係留力の算定, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集, 1997 (投稿中)