

大規模浮体の波浪中弾性挙動の実験と解析

Experiment and Analysis of Wave Response of a Large Flexible Floating Structure

中井幸治*・林 伸幸*・関田欣治**・宇都宮智昭***・渡邊英一***

Koji Nakai, Nobuyuki Hayashi, Kinji Sekita, Tomoaki Utsunomiya and Eiichi Watanabe

This paper deals with a large scale pontoon-type structure such as floating airport. Experiments have been performed for the 2-D model structure made of polyurethane plate and having the length of 10m, the width of 0.5m and the thickness of 76mm, 38mm and 19mm. The experimental results have shown that the wave response of such flexible structure clearly differ from the rigid-body motions. Some experimental results are presented and are compared with the numerical examples using BE-FE combination method for the 2-D structure.

Key words : flexible floating structure, hydro-elasticity, wave response, BE-FE combination method

1. はじめに

現在構想されている浮体式海上空港のような超大型浮体は、従来の浮体に比較し相対的に柔な挙動を示すため、剛体と仮定することができない。また、浮体の長さ比べ波浪が数波も入るような波浪条件になることが多く、スケール効果により運動そのものが小さくなり、浮体に発生する断面力も減少することが考えられる。従って、構造物の弾性変形を考慮した上で波浪応答を求めることが必要と考えられる。

本研究では、マリンスフロート推進機構で提案されているような大規模箱形浮体¹⁾を対象に、これと等価な剛性を有するもの、またその1/8倍、及び8倍の剛性を有する3種類の2次元縮尺模型（模型長 10m）を用いた波浪中の動揺挙動実験により、剛性の違いが浮体の変形や曲げ応力応答へ及ぼす影響を検討した（ここで想定する実機は1000m 長である）。また、浮体長 L と波長 λ の比 L/λ をパラメータに、スケール効果による応答の低減効果を実験的に調べた。

以上の一連の実験結果について、境界要素法（BEM）－有限要素法（FEM）結合解法による浮体の弾性応答解析プログラム²⁾³⁾を用いて比較検討を行い、大規模浮体の弾性影響とスケール効果が挙動に及ぼす影響を明らかにするものである。

2. 解析理論

剛体としての浮体の波浪中の動揺解析においては、水面、海底、無限遠点、及び物体表面での境界条件を考慮してラディエーションポテンシャル（付加質量力、造波減衰力）とディフラクションポテンシャル（波浪強制力）を求め、ベルヌーイの式により流体力を算定し、浮体の運動を解いている。

この場合、線形回折波理論によれば、次式のように全速度ポテンシャル Φ が各速度ポテンシャルの線形重ね合わせにより表される。

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_d + \sum_{q=1}^N \dot{s}_q \phi_q$$

ここで、 Φ_0 は入射波のポテンシャル、 Φ_d はディフラクションポテンシャル、 ϕ_q は剛体の各運動自由度（ $q=1 \sim N$; $N=6$ ）の単位速度振幅に対応するラディエーションポテンシャルである。また、 $\dot{s}_q$ は運動の速度である。

一方、浮体を弾性体として扱う場合には、浮体の運動自由度は無窮大となるが、適当な離散化を施すことでこれを N 自由度系とし、各運動自由度に対してそれぞれラディエーションポテンシャル ϕ_q を求めればよい。本研究では、没水浮体境界に基本解を用いた境界要素法（BEM）によりラディエーションポテンシャルを求め、浮体構造に有限要素法（FEM）を用い、流体－構造系の相互作用（造波抵抗力）を考慮して波浪応答を解析する²⁾³⁾。ここで、BEM－FEMの両者に線形要素を用いれば、節点間の速度分布は一義的に決定され、適合条件

* 正会員 新日本製鐵（株）鉄構海洋事業部 技術開発部

(229 相模原市西橋本5-9-1 相模原技術センター)

** 正会員 新日本製鐵（株）鉄構海洋事業部 海洋・鋼構造エンジニアリング部

*** 正会員 京都大学工学部土木工学科

における整合性を満足する。なお、運動方程式は以下になる。

$$(M + M_a)\ddot{s} + C\dot{s} + Ks = F_0$$

ここに、 M 、 M_a 、 C 、 K はそれぞれ質量、付加質量、造波減衰、復原力マトリクス、 F_0 は強制波力ベクトルで、 s 、 $\dot{s}$ 、 $\ddot{s}$ は物体運動の変位、速度、加速度である。本手法によれば、弾性浮体の解析にFEMを採用するため、剛体変位モードが自然に取り込まれ、かつ任意形状に対応できる。

3. 実験方法

3-1. 実験モデルと縮尺

想定する箱形浮体の寸法を、長さ5.000(m)、幅1.000(m)、高さ4.5(m)の大規模なものとし、デッキ構造をウェブ15(m)間隔の面構造、フランジ厚18(mm)、ウェブ厚28(mm)とすれば、100(m)幅当たりの断面剛性は 5.0×10^{11} (kg・m²)程度となる¹⁾。

2次元浮体動揺実験は、想定実機の1/100縮尺の模型に対して行った。模型寸法は、長さ10(m)、幅0.5(m)とし、実機に換算すれば短辺長に相当する1,000(m)長さとなり、弾性挙動を検討するのに充分の長さを有するものと考えられる。浮体の剛性が波浪中における浮体の動揺に及ぼす影響を調べるために、高さ(断面剛性)の異なる3種類の模型を用意した。表-1に実験模型の諸元を示す。表中のBモデルが、想定実機の断面剛性に相当するモデルである。なお、模型の材質は、比重0.22、ヤング率1.051(kg/cm²)の物性値を有するポリウレタンである。

実験は、新日本製鐵(株)相模原技術センター内の2次元造波水路において、水深1.1(m)にて実施した。2.5(m)幅の水路を2つに仕切り、幅0.5(m)相当分を実験水路とした。浮体模型の動揺を妨げないように波上側で緩い線形ばねで係留し、長手方向から波を入射した。規則波は、実機換算で0.5、1.0、2.0(m)に相当する5、10、20(mm)を入射波高とし、波周期を実機換算で5~30(sec)に相当する0.5~3.0(sec)の範囲で系統的に変化(26ケース)させた。

表-1 実験模型諸元

	長さ(m)	幅(m)	板厚(mm)	剛性比
Aモデル	10	0.5	76	8
Bモデル	10	0.5	38	1
Cモデル	10	0.5	19	1/8

表-2 計測項目

計測項目	計測点数
鉛直方向変位	11
浮体端部軌跡	1
曲げ歪み	23 × 2 (上下両面)
波高(入射, 反射, 透過)	4

3-2. 測定方法

断面剛性(高さ)を変化させた3種類の浮体に対して、波高と波周期を変化させた波浪を入射し、それにより発生する長さ方向各点(1m間隔、計11点)の鉛直方向変位、及び曲げ歪みを測定した。なお、最先端部の鉛直方向変位の計測には画像計測装置を用いた。実験計測の概略を図-1に、計測項目を表-2に示す。

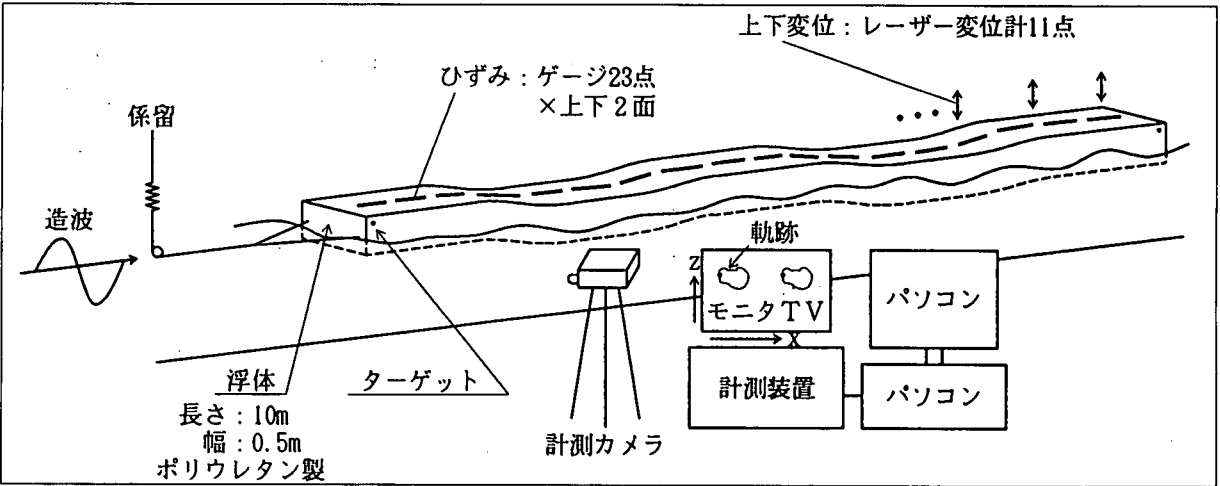


図-1 実験計測の概略

4. 実験結果による剛性影響の検討

ここでは、規則波を入射した場合の鉛直変位及び曲げモーメント応答について比較を行い剛性の及ぼす影響を検討する。鉛直変位及び曲げモーメント応答は、実験波高 5～20(mm)の範囲では波高に対して比例することが実験より確認されたので、これらの応答を半波高振幅 ζ_a で除し、その値を、浮体長さ L を波長 λ で除した無次元値 L/λ をパラメータにして整理する。実験における浮体長と波長との比 L/λ を表-3に示す。

表-3 浮体長と波長の比

波周期 (sec)	波長 λ (m)	浮体長/波長 L/λ
0.6	0.56	17.90
0.7	0.76	13.15
0.8	0.99	10.07
1.0	1.55	6.44
1.11(0.90Hz)	1.92	5.22
1.43(0.70Hz)	3.11	3.22
1.67(0.60Hz)	4.05	2.47
2.00(0.50Hz)	5.35	1.87
2.86(0.35Hz)	8.47	1.18

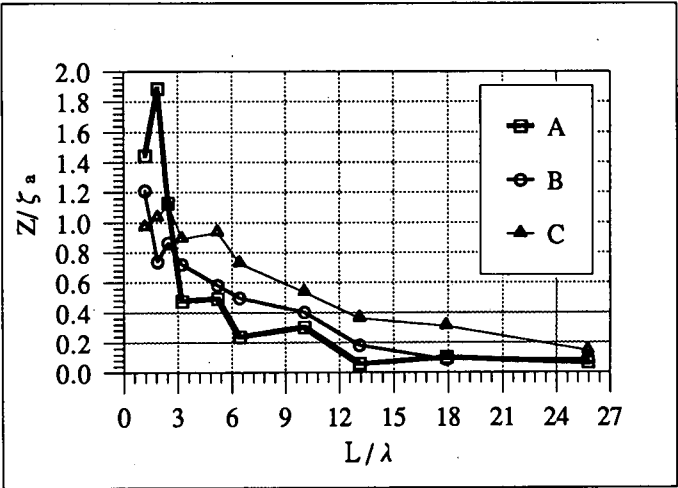
4-1. 鉛直変位応答と剛性影響

本節では、断面剛性の異なる3種類の浮体の上下変位応答の実験値について比較検討する。図-2(a)～(c)に、各浮体の波が入射する側の波上側端部、中央部及び波下側端部（ここでいう端部は、浮体長さ L の1.25%内側の位置）における鉛直変位の片振幅値 $|z|$ を半波高振幅 ζ_a で除した無次元値で示す。

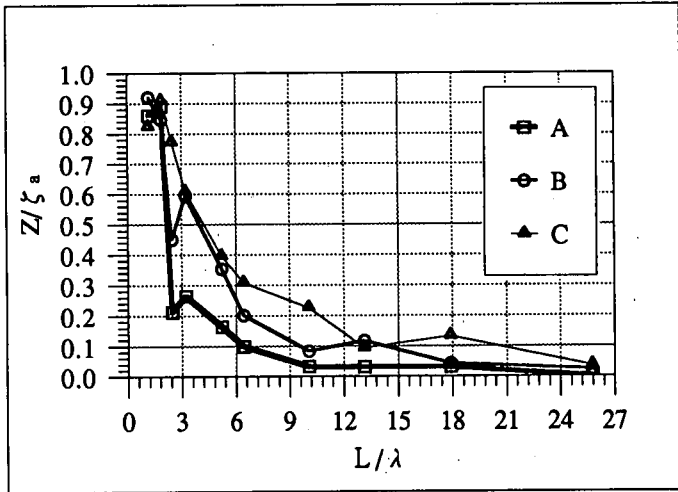
浮体中央部（図-2(b)）に着目すると、浮体長さに比べ含まれる波の数が少ない $L/\lambda = 1 \sim 2$ の間では、浮体が入射波形に沿うように挙動するため、浮体の剛性にあまり関係なく鉛直変位振幅の応答は大きな値となる。 $L/\lambda = 2 \sim 10$ の間では、剛性の影響が明確に表れており、剛性が大きいほど鉛直変位振幅の応答は小さい。しかし、 $L/\lambda \geq 10$ になるとスケール効果が現れ、浮体の剛性がその挙動に及ぼす影響は比較的小さくなる。

Aモデル、Bモデルそれぞれの波上・波下両端部の鉛直変位応答量は同じ程度である。浮体底面に作用する波強制力は波上側で大きく、波下側に向けて減衰するため、一般的に波上側での応答が波下側に比べて大きくなると思われるが、そうはなっていない。入射波周期と固有周期が近い場合には固有モード運動が強く現れ、この場合にはモード形状の影響のために両端部の応答量に大きな差が生じていないものと思われる。

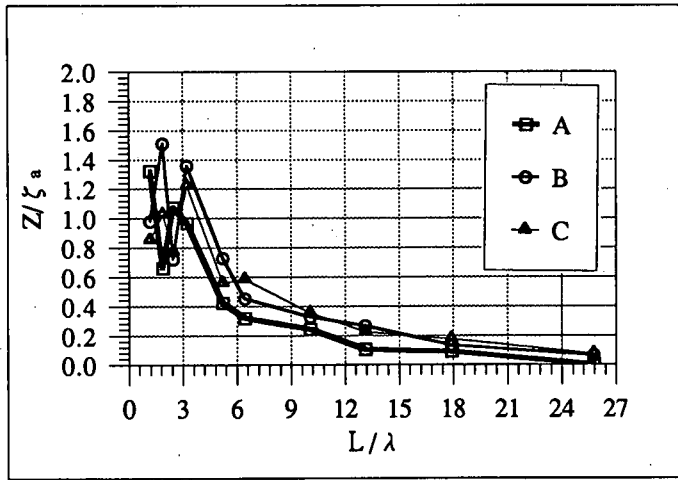
一方、Cモデルでは、波上側の鉛直変位応答は波下側に比べ大きい。これは、剛性が小さいために、固有運動よりも底面に作用する波力の影響の方が大きく現れるためと考えられる。



(a) 波上側端部 ($x=-487.5\text{cm}$)



(b) 中央部 ($x=0\text{cm}$)



(c) 波下側端部 ($x=487.5\text{cm}$)

図-2 3種類のモデルの最大鉛直変位（実験値）

4-2. 曲げモーメント応答と剛性影響

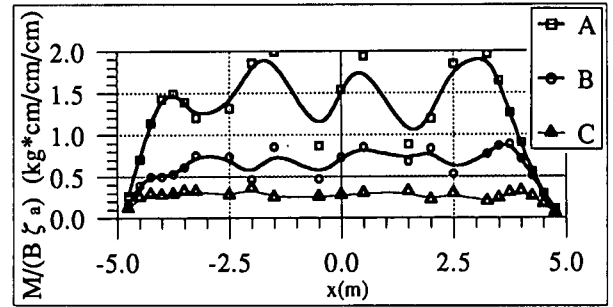
3種類のモデルに生じた曲げモーメントの最大値 $|M|$ を、浮体幅 B と半波高振幅 ζ_a で除して図-3 (a) ~ (d) に示す (実線は実験値を平滑化したもの)。各 L/λ (波周期) において、剛性の大きいAモデルに発生する曲げモーメントが最も大きく、剛性の小さいCモデルに発生するものが最も小さい。 L/λ が 1.87, 3.22及び6.44 (波周期2.0, 1.4及び1.0sec) のケースの、浮体各位置に生ずる最大曲げモーメントの包絡線は局所的に極大・極小値をもち、剛体とは明らかに異なる特性が表れている。Aモデルでは、 L/λ が 1.87, 3.22では3カ所、 L/λ が 6.44では4カ所に極大値がみられるが、浮体の剛性が変化すれば最大曲げモーメントの包絡線の形状も変化していることがわかる。

つぎに、3種類の浮体に発生する最大曲げモーメントを、Bモデルに発生したもので除して図-4に比較する。 L/λ が1.18では、各浮体に発生する最大曲げモーメントの比は、ほぼ剛性比と同程度となるが、 L/λ が6.44になるとAモデルはBモデルの約2倍、Cモデルは約半分となる。 L/λ が25以上になるとAモデルとBモデルに発生する最大曲げモーメントの差異は小さい。浮体を剛体として取り扱う場合、ミューラーの式によれば⁴⁾、波長が浮体長の1.12倍であるとき浮体中央部にもっとも大きな曲げモーメントが発生する。剛性の大きいAモデルについて実験値をみると L/λ が1.18 (≈ 1.12) のケースの最大曲げモーメントは、単位幅単位半波高振幅 $B\zeta_a = 1(\text{cm} \cdot \text{cm})$ 当たり約3($\text{kg} \cdot \text{cm}$)であるが、 L/λ が1.87では約2倍近くの曲げモーメントが発生している。また、 L/λ が 3.22においても約4($\text{kg} \cdot \text{cm}$)と大きく、明らかにミューラーの式と異なっている。

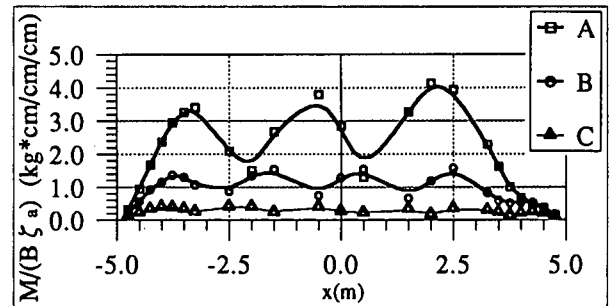
表-4に、ミューラーの式で計算した浮体中央部に生じる曲げモーメントを、3種類の浮体の実験値で除した比を示す。 $L/\lambda = 1.18$ のケースでは、ミューラー式による計算値と実験値との差は大きく、Bモデルでは約100倍の違いがでている。また、浮体の剛性が低いほど差は大きい。ミューラーの式は、大規模箱形浮体のように水深喫水比が小さい場合や、浮体の動揺を考慮する場合 (ミューラーの式では浮体の動揺は拘束されている) に比べて、浮体に生ずる断面力が大きく計算されるが⁴⁾、本実験模型の様に弾性変形の顕著な場合には、明らかに適用不可となる。これは、ミューラーの式による曲げモーメント計算値が浮体長の2乗に比例することからも明らかであろう。

表-4 最大曲げモーメント (ミューラー式/実験値) との比

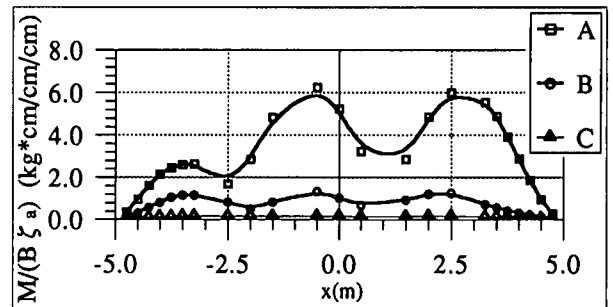
	L/λ		
	1.18	1.87	3.22
Aモデル	16.5	1.4	1.0
Bモデル	100.0	6.7	2.0
Cモデル	684.2	43.2	9.6



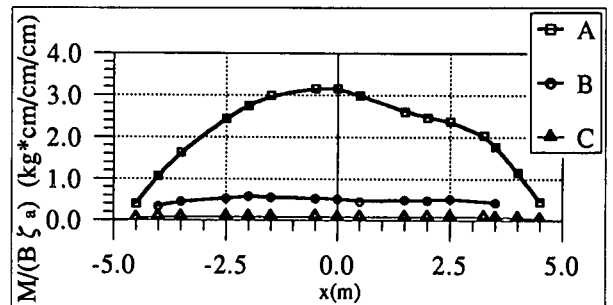
(a) $L/\lambda = 6.44$ ($T = 1.0 \text{ sec}$)



(b) $L/\lambda = 3.22$ ($T = 1.43 \text{ sec}$)



(c) $L/\lambda = 1.87$ ($T = 2.0 \text{ sec}$)



(d) $L/\lambda = 1.18$ ($T = 2.86 \text{ sec}$)

図-3 曲げモーメント応答の実験値

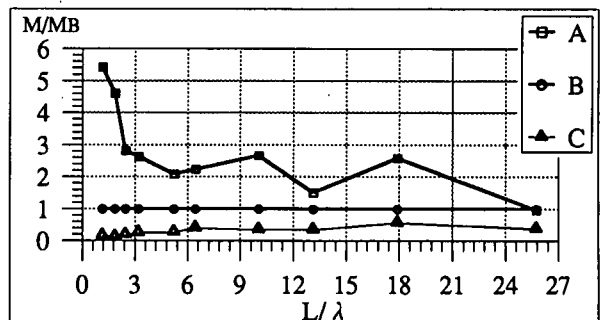
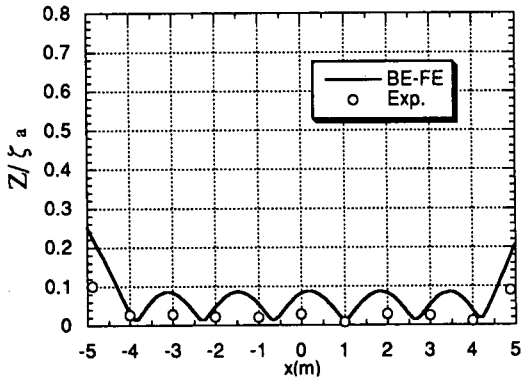


図-4 最大曲げモーメント比 (Bモデルの実験値を1)

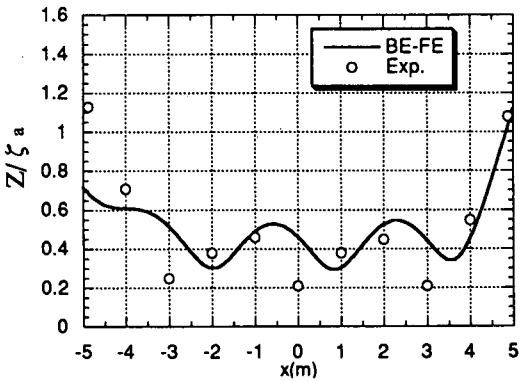
5. 解析値と実験値の比較検討

5-1. Aモデルの鉛直変位応答

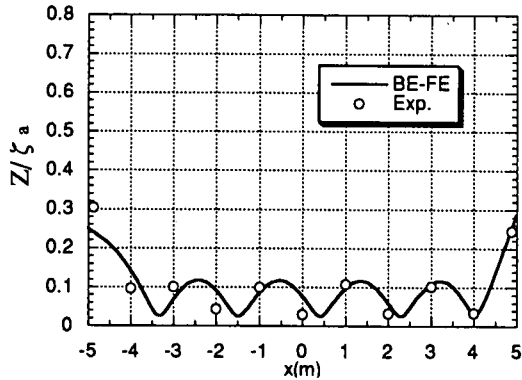
表-3の条件のもとで、Aモデル各位置で発生した鉛直変位の片振幅値 $|z|$ について、実験値と解析値の比較を図-5(a)~(e)に示す。横軸は浮体長さ方向の位置、縦軸は浮体各位置に発生した鉛直変位の片振幅値 $|z|$ を半波高振幅 ζ_a で除した無次元値である。弾性影響を考慮したBE-FE結合解法による箱形浮体の波浪応答解析値は、実験結果とよく一致しており、大規模箱形浮体の挙動推定に有効な方法であることが確認できる。実験、解析結果ともに、周期依存性が顕著であり、周期が長くなるにつれて振幅波高比が徐々に小さくなる、いわゆるスケール効果がみられる。図-6に、Aモデルの波周期に対する最大応答変位（最大変位はすべて端部で発生している）の実験値及び解析値を示す。長周期側において特によい一致をみている。



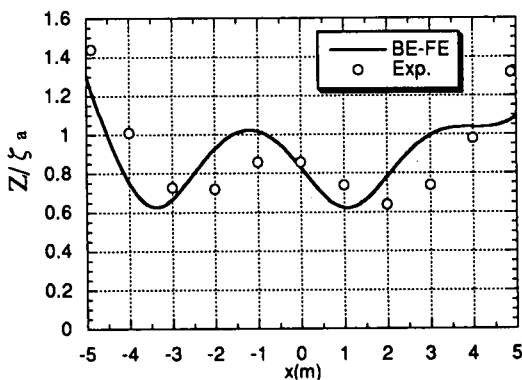
(a) 波周期 $T=0.6\text{sec}$



(d) 波周期 $T=1.67\text{sec}$

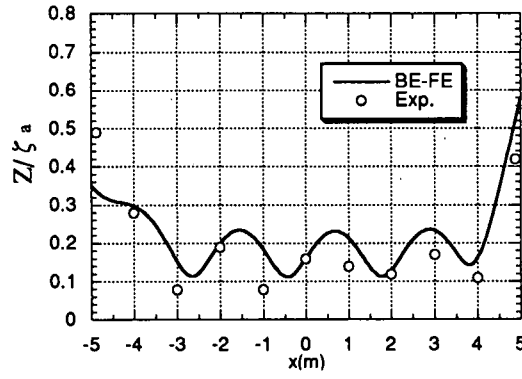


(b) 波周期 $T=0.8\text{sec}$



(e) 波周期 $T=2.86\text{sec}$

図-5 鉛直変位応答の解析値と実験値の比較



(c) 波周期 $T=1.11\text{sec}$

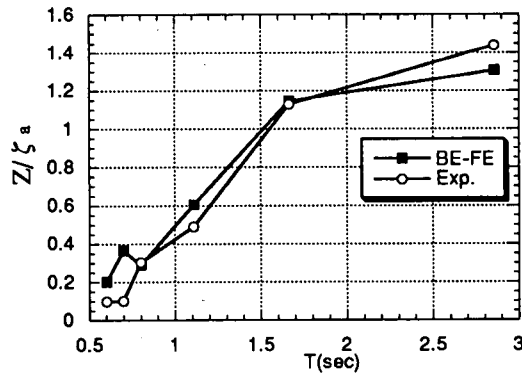


図-6 最大鉛直変位の解析値と実験値の比較

5-2. 曲げモーメント応答

Aモデルの各位置に生ずる最大曲げモーメント $|M|$ について、浮体の弾性影響を考慮したBE-FE結合解法により求めた結果を実験値と比較する。波周期 $0.8(\text{sec})$ のケースを図-7に示す。鉛直変位応答がよく一致しているのと同様、BE-FE結合解法は最大曲げモーメントの定量値もよく捉えている。

図-8 (a)～(c)に、A, B, 及びCモデルに生ずる最大曲げモーメント $|M|$ の解析値及び実験値を示す。両者は、ほぼ一致していると言えるが、解析値は実験値よりやや大きな値となっている。これは、曲げモーメントは50(cm)間隔で貼付された歪みゲージにより計測されているため、最大歪みが発生する位置と歪みゲージ位置が一致しない場合が多いため、計測される実験値が最大曲げモーメントを捉えていないためと考えられる。このことを考慮すれば、解析値と実験値はよく一致していると言える。

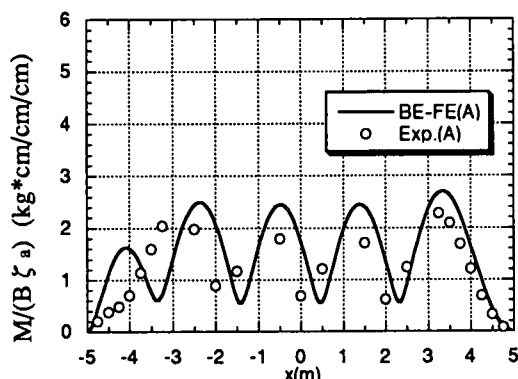
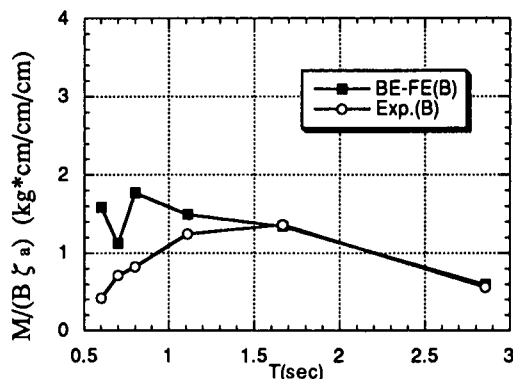
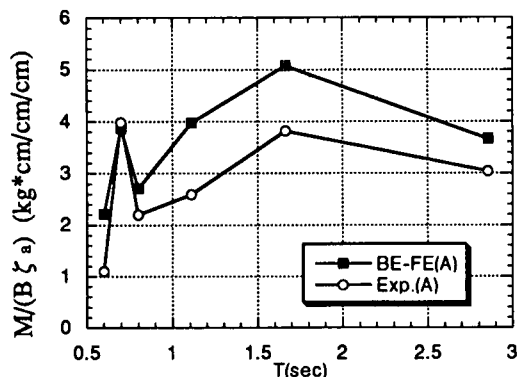


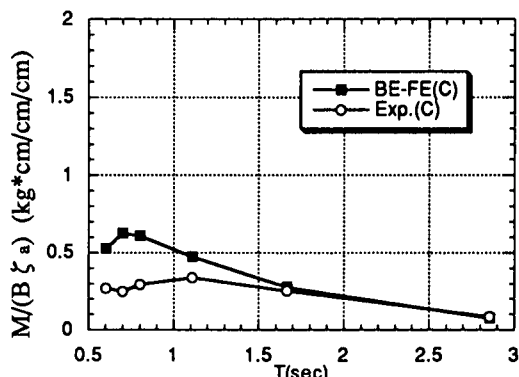
図-7 Aモデルの曲げモーメント応答 ($T=0.8\text{sec}$)



(b) Bモデルの最大曲げモーメント



(a) Aモデルの最大曲げモーメント



(c) Cモデルの最大曲げモーメント

図-8 最大曲げモーメントの実験値と解析値の比較

6. 結論

剛性を変えた3種類の大型浮体模型による実験、及び弾性影響を考慮した BE-FE結合解法による波力応答解析により、浮体の曲げ剛性が波浪中における動揺挙動に及ぼす影響を検討した。結論を以下にまとめる。

- 1) 剛性の異なる3種類の模型を用いた実験より、浮体長と波長の比 L/λ が2～10の範囲において剛性が鉛直変位応答に及ぼす影響が最も大きい。2以下では、剛性によらず半波高振幅と同程度の鉛直変位振幅が発生し、10以上ではスケール効果により剛性影響の際立った差異は現れない。また、最大変位はすべて浮体端部で発生する。
- 2) 浮体中央部に最大曲げモーメントが生じる剛体とは異なり、弾性体に作用する曲げモーメント分布は、高次の撓み変形により局所的な極大値が生ずることにより平均化される。そのため、浮体中央部よりもむしろ端部側に近いところで曲げモーメントの最大値が現れる。また、浮体を剛体と仮定するミューラーの式は適用できない。
- 3) 弾性影響を考慮した BE-FE結合解法による波浪応答解析結果は実験結果とよく一致しており、大規模箱形浮体の挙動推定に有効な方法である。

参考文献

- 1) 太田：浮体式海上空港構想、日本造船学会 第12回海洋工学シンポジウム、1994、pp.75-81
- 2) 林、渡邊、宇都宮：FEM-BEM結合解法による大型弾性浮体の波力応答解析、土木学会 第49回年次学術講演会、1994
- 3) Utsunomiya, T., Watanabe, E., Wu, C., Hayashi, N., Nakai, K., Sekita, K. : Wave Response Analysis of a Flexible Floating Structure by BE-FE Combination Method, Proc. ISOPE-95, 1995(to be presented)
- 4) 上田、白石、甲斐：箱型浮体の波浪によるせん断力と縦曲げモーメントの計算法について、港湾技研資料、No.505、1984
- 5) 竹沢、平山、上野、梶原：方向スペクトル波中の超大型海洋構造物応答実験、日本造船学会論文集、1992、pp.51-63
- 6) 鈴木、富田、松森：可撓性浮体の波浪中動揺と消波特性の数値解析、日本造船学会 第12回海洋工学シンポジウム、1994、pp.137-144
- 7) 白石、米山、上田：弾性変形を考慮した長大浮体の波浪中の動揺特性の検討、土木学会 海岸工学論文集、第41巻、pp.896-900、1994