

L字型減揺構造による大型浮体の 弾性応答の低減について

ON THE RESPONSE REDUCTION OF LARGE FLOATING STRUCTURES
BY USE OF L-SHAPE ATTACHMENT

飯島一博¹・白石悟¹・珠久正憲²・井上俊司³・田中一郎⁴
Iijima, K., Shiraishi, S., Shuku, M., Inoue, S. and Tanaka, I.

¹正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 構造部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²工博 三菱重工業株式会社 船舶・海洋事業本部 (〒100-8315 東京都千代田区丸ノ内2-5-1)

³工修 三菱重工業株式会社 船舶・海洋事業本部 (〒100-8315 東京都千代田区丸ノ内2-5-1)

⁴川崎重工業株式会社 船舶事業部 (〒650-8670 神戸市中央区東川崎3-1-1)

Large floating structures are expected to be among alternatives for ocean space utilization in deeper coastal area. It has been reported that elastic response is dominant over rigid motions due to their large dimensions with comparatively small bending rigidities. The elastic response must be decreased in order for the enhancement of the rate of operation and the applicability to severer sea area. L-shape attachment structure which is attached to the weather side of the floating structures is especially investigated for this purpose here. First, the attachment structure is experimentally shown to be effective from the viewpoint of vertical response. Numerical calculations are also conducted by use of rigorous numerical method proposed by a part of the present authors. It is shown that the numerical results have a good accordance with the experimental results. In order to clarify the response reduction mechanism, numerical studies are carried out.

Key Words : Large floating structure, elastic response, response reduction, L shape structure, hydroelasticity

1. 緒言

大型浮体構造は港湾構造物の大水深化に対応でき、また地震に強く環境にも優しい海洋空間利用手段の一つとして期待されている。大型浮体は長辺の長さが数百メートル以上と規模が大きく、また、構造深さが数メートル程度であるために、相対的な剛性が小さくなっている。その結果、船舶などで問題とされる剛体運動よりもむしろ弾性応答が卓越するとされ、波浪による弾性応答の研究が行われてきた^{1)~3)}。

一連の研究の結果、弾性応答が無視できないこと、また、施設の稼働率向上やより環境条件の厳しい港湾域への設置のためにはこの弾性応答を低減する必要がある場合のあることが分かってきた⁴⁾。港湾では従来から、波浪の制御のために防波堤や岸壁などに消波構造が用いられているが、本論文では応答低減の一つの方法として、これに類似した構造物を浮体側面に付加することを検討し、模型実験及び数値計算によりその効果を確認する。ついで、数値実験により応答低減効果のメカニズムを探るものとする。

2. 数値解析理論

本論文で用いた数値解析理論は著者らのうちの一人によってすでに開発されたものである⁵⁾。ここでは理論概要⁶⁾を示すが、今回の問題への適用に際しては、後述の改良を加えている。

(1) 理論概要

流体は非回転・非圧縮とし、また、動揺や波振幅は全て微小であることを仮定する。任意に配置された N 個の要素浮体に角周波数 ω の平面波が入射し、浮体からの散乱や動揺が定常状態に達した状況を考える。ある要素浮体 i からのディフラクション ϕ_i^D は要素浮体 i に関する局所円筒座標を用いて、

$$\phi_i^D(r, \theta) = \frac{\cosh[k_0(z+h)]}{\cosh k_0 h} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{0ni} H_n^{(1)}(k_0 r) e^{in\theta} + \sum_{m=1}^{\infty} \cos[k_m(z+h)] \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{mni} K_n(k_m r) e^{in\theta} \quad (1)$$

で表される。ここで、 $H_n^{(1)}$ は n 次の第一種ハンケル関数を、 K_n は n 次の第二種変形ベッセル関数である。式中の第一項目は進行波成分を、第二項目は局部波成分を表している。 k_0 及び k_m はそれぞれ次の式から得られる。

$$k_0 \tanh k_0 h = \frac{\omega^2}{g} = K \quad (2)$$

$$-k_m \tan k_m h = K, \quad (m - \frac{1}{2})\pi \leq k_m h \leq m\pi \quad (3)$$

式(1)を次のような行列表示に書き直す。

$$\phi_i^D = \{A_i\}^T \{\psi_i^D\} \quad (4)$$

ある要素浮体 j に関しての全ての入射と散乱の関係から、各 A_i 間には次式が成立しなければならない⁹⁾。

$$\{A_j\} = [B_j] \left\{ \{a_j\} + \sum_{i=1}^N [T_{ij}]^T \{A_i\} + \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^M -i\omega\eta_{ii} [T_{ij}]^T \{R_{ii}\} \right\} \quad (j=1 \sim N) \quad (5)$$

ここで要素浮体 i の動揺あるいは変形によるラディエーションポテンシャルは複素変位振幅 η_{ii} により、

$$\sum_{i=1}^M -i\omega\eta_{ii} \{R_{ii}\}^T \{\psi_i^D\} \quad (6)$$

で表されることを用いている。式(5)中で、 $\{a_j\}$ は平面入射波を要素浮体 j に関する円筒関数で表したときの係数であり、 $[T_{ij}]$ は局所座標系 i から j への座標変換行列を示す。 $[B_j]$ は要素浮体 j が単体で存在する場合の散乱特性を表す行列であり、また、式(6)中の $\{R_{ii}\}$ は単体としてのラディエーション特性を表すベクトルである。ここでは要素浮体単体に特異点分布法を適用し、ディフラクション問題及びラディエーション問題を解いて得られた結果を用いて、これら特性を求めている。式(5)中の M は要素浮体についての考慮する運動モード数を表し、剛体運動のみを考慮する場合には6、要素浮体の弾性変形モードを加える場合にはそれ以上になる。各要素浮体の剛性モードあるいは弾性モードの重合によって、浮体全体の弾性変形を表現していることになる。

変位 η_{ii} が決定されれば、式(5)から散乱を表す係数 A_i が決まる。すなわち、流体の場が得られるのでベルヌイの定理を介して、浮体構造に働く外力が得られる。変位 η_{ii} は外力項に係数 A_i を含んだ運動方程式を解くことで得られる。この運動方程式は浮体構造の弾性影響を含む多自由度のものである。実際には係数 A_i と η_{ii} を含む変位ベクトル η を未知数とする連立方程式を解くことで、 A_i と η 、すなわ

ち外力と応答が同時に解かれる。このとき、未知数を減ずるために、複数の要素浮体をひとつの要素浮体として扱うgroup bodyの概念と、大規模問題に対する有限要素法でしばしば用いられる部分構造法を用いている。

3. 水理模型実験

減揺構造による大型浮体弾性応答の低減効果を調べるために、港湾技術研究所内の二次元水路にて水理模型実験を行った。

(1) 実験模型

実験模型の概略図及び主要寸法について表-1及び図-1に示した。剛性を受け持つ構造部分はアルミ製であり、浮力を得るための浮体部分については発泡スチロール製となっている。表中には仮想的な実機についての諸元についても示しており、模型縮尺は仮に1/50としている。各諸元はフルードの相似則に従っており、剛性については面外曲げについての相似則が満たされている。この実験模型を基準浮体として、基準浮体前面に応答低減を狙った減揺構造を付加した。減揺構造の形状などについて図-2に示されている。

表-1 浮体構造諸元

諸元	縮尺	仮想実機	実験模型
長さ L (m)	1/50	500.0	10.0
幅 B (m)	1/50	30.0	0.6
高さ D (m)	1/50	7.0	0.14
喫水 d (m)	1/50	2.0	0.04
質量 M (kg)	(1/50) ³	3.0×10 ⁷	240.0
剛性/幅 EI/B (Nm ⁴ /m)	(1/50) ⁴	8.8×10 ¹⁰	1.4×10 ⁴

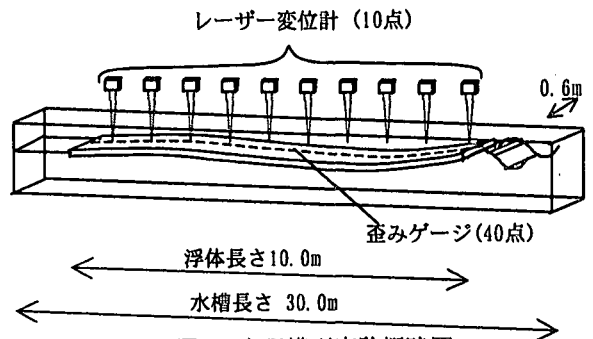


図-1 水理模型実験概略図

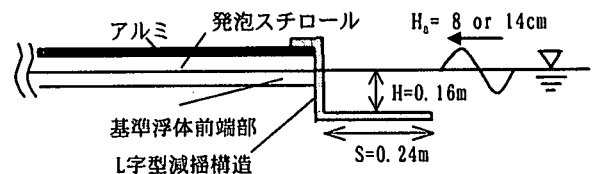


図-2 L字型減揺構造模型概略図

(2) 実験条件

設置海域が水深30mと想定し、相似則から実験における水深は0.6mとした。本実験は現象の解明などを行うための基礎的なものとして位置づけ、波浪は規則波とした。波高は実機換算で4mと7m、周期は実機スケールで6sから16sを選んでいる。なお、実験結果を示す際には、波高4mに対応する結果のみを示したが、波高についての線形性は比較的良好に成立することが本実験により確認されている。

(3) 測定項目

上下方向の変位について浮体長さに渡ってほぼ等間隔に10点をレーザー変位計により計測し、構造応答を代表する縦曲げの歪みについては、40点を選び歪みゲージを用いて計測した。これら主な応答計測に加えて、浮体前端付近での加速度、係留力を推定するためのレーザー変位計による前後変位、容量式波高計による浮体前後の4カ所の波高を計測した。

4. 実験結果及び考察

(1) 数値解析法の適用方法

第2章に示した数値解析手法は本来、離散的な多数要素浮体からなるいわゆるセミサブ式大型浮体の三次元的な問題の解析のために開発されたものである。ポンツーン型浮体の場合でも、多数要素浮体に分割して、要素浮体間の相互干渉問題として解析すればよいことが最近の研究で分かってきているので、ポンツーン型浮体への適用に大きな問題はない⁹⁾。

一方で、今回の問題は浮体側面近傍に固体壁を有する流体力学的には二次元的なものである。幅が十分に大きければ流体力学的には二次元問題に近いと考えられ、このとき浮体が幅方向に曲率を持たないような構造モデル上での工夫をすればそのまま本解析手法が適用できるが、実際に浮体長さ10mに対して、浮体幅を10mとする3次元計算を行っても、流体力学的には二次元的な状態を模擬することができないことがわかった。さらなる浮体幅の増加は計算量の大幅な増加につながり数値計算上有利ではない。

そこで、鏡像を用いることで流体力学的には擬似的に二次元状態をモデル化する。すなわち、幅方向に同じ散乱を有する浮体を無限に近い個数だけ反復配置する。同じ散乱を有するという仮定を行うので未知数の増加には繋がらない。このとき、構造は実験モデルと同じ幅の梁要素としてモデル化するので幅方向の撓みの問題も解消できる。

また、本問題を扱うに際しては、水平動揺解析の扱いにも注意を払う必要がある。今までのポンツーン型浮体問題への適用の結果、実験値との良い相関を得ているが、上下方向への撓みだけを問題としてきた。ところが、付加構造のついた構造の場合には、上下方向撓みを低減させる反面、水平方向の動揺を増加させる可能性があり、新たな構造を提案するためには、水平方向動揺も含めて総合的に評価する必

要があると考えられる。そこで、ポンツーン型浮体の水平方向動揺に適用できるようなモデル化を考える必要がある。

本手法では、ポンツーン型浮体を箱形要素浮体に分割し、多数浮体問題に帰着させる。この時、波荷重を評価する際に、隣接し向かい合う壁面の両面で圧力を積分してしまうと、特に付加質量について2重の見積もりをしてしまう。従来、本手法を適用してきた半潜式式の浮体ではこのことは問題にならない点である。そこで、本来、壁面がないところでは圧力の積分を行わないとする変更を行った。図-3には係留された箱形浮体の水平動揺についての特異点分布法による解析と、箱形浮体を3×3の9つの要素浮体に分割してモデル化し、本手法によって解析した結果を比較した。両者は十分な精度で一致しており、向かい合う壁面で二重に積分した場合には、付加質量が大きめに見積もられた結果、水平方向の固有周波数が小さめに計算されていることがわかる。

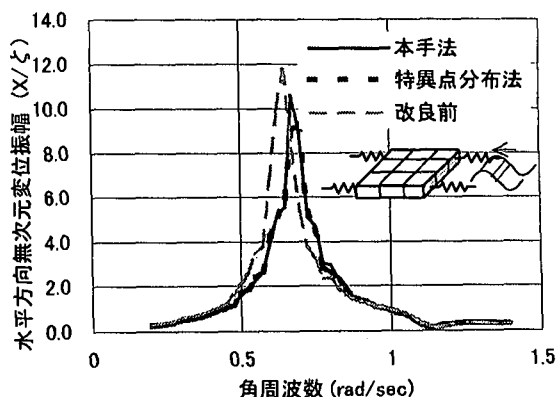


図-3 水平動揺計算比較

(2) 実験結果

図-4に付加構造がない基準浮体の上下変位振幅分布の実験結果を、数値計算結果と併せて示した。同様に図-5にはL字型の減揺構造を付加した浮体の上下方向変位の振幅分布について示した。これらの図から、入射波周期が大きい場合の浮体前端部で実験結果と数値計算結果のずれがやや目立つが、数値計算は分布形状の山谷を的確に予想できていることがわかり、応答の大きさもよく推定できているといえる。全体として、定性的にも定量的にもよい相関が得られていると判断できる。ただし、L字型減揺構造が付加した場合については、数値計算は応答を大きめに見積もる傾向がやや強く見られる。

図-6には基準浮体の歪み応答の振幅分布が示されている。同様に図-7にはL字型減揺構造が付加した構造について示されている。変位応答でも見られたように、大きな周期では数値計算は応答を大きめに見積もる傾向が見られるものの、数値計算結果は定性的にも定量的にもよく実験結果を説明していることがわかる。実験値、計算値とも、L字型減揺構造の効果が現れ、特に応答を減ずることが容易でない

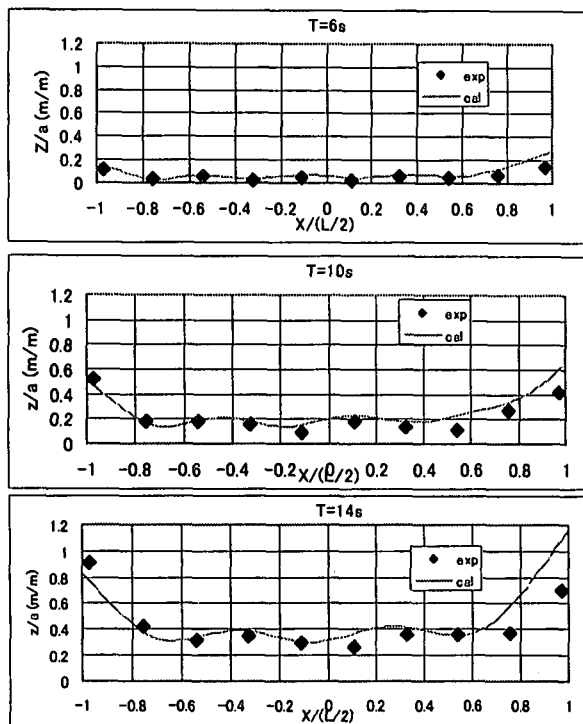


図-4 基準浮体上下変位分布

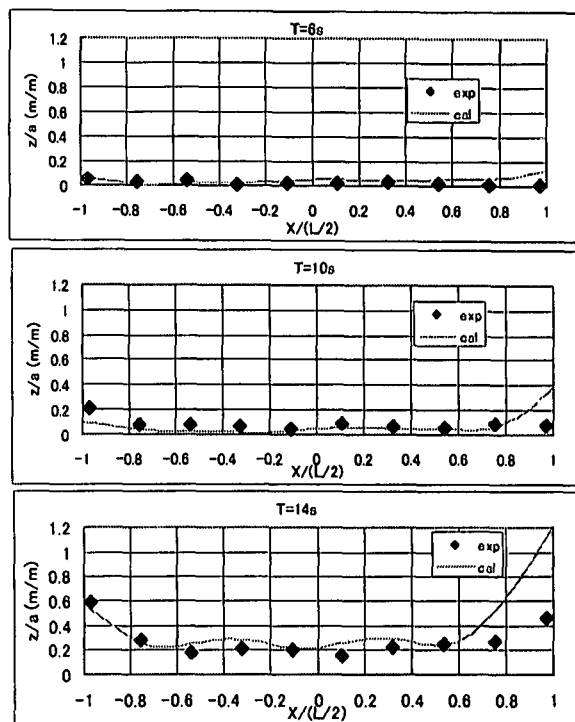


図-5 L字型減揺構造付き浮体上下変位分布

とされる、長周期域の周期10s付近でも減揺効果が大きい。

なお、歪みの実機浮体への換算は本来の構造深さ7mで換算するべきであるが、ここでは、模型実験で得られた歪みをそのまま用い、波高4mあるいは波振幅2mで除した時の単位波振幅あたりに換算して表示している。

L字型減揺構造を付加することの効果は変位応答と構造応答の両方に現れ、実験からも数値計算からも確認できる。比較的長周期である10秒程度でも効果が3割程度以上になっていると総括される。

(3) 考察

ここまで見てきた上下方向の変位応答や縦曲げなどについては、L字型減揺構造は、その散乱効果により一定の応答低減効果があることがわかった。一方で、水平方向の応答については低減よりもむしろ増加させていることが予想される。図-8に示すように、水平方向変位の大きさは基準浮体に比較して、2倍から10倍程度になることがわかる。図中には参考のために、鉛直板だけからなるカーテンウォール型減揺構造についての数値計算結果も示した。また、減揺構造を付加することでより大きな反射波が生じることもわかる(図-9)。反射波の増大は波漂流力の増大である。水平一次波力の増大と漂流力の増大は、係留設計のために重要な設計荷重増加に繋がりが好ましくない。L字型減揺構造は上下方向に関する応答量を低減させるので、浮体構造設計の点では有利であるが、一方で係留設計の観点からは不利というトレードオフの関係にあるといえる。実際にL字型減揺構造を用いる際には、上下方向応答と水平方向応答の両者を勘案して最適な減揺構造を設計す

る必要がある。

そのためにも、L字型減揺構造の減揺メカニズムを明らかにしておく必要があると考えられる。減揺メカニズムは大きく、ディフラクションによる波エネルギー散乱効果、ラディエーションによる波エネルギー散乱効果、減揺構造部分の波力とその付近での波力との間での位相差に起因する波力相殺効果に分類されると考えられる。ただし、減揺構造として基準浮体に付加した場合にはディフラクションとラディエーションは相互に影響し合うので、両者を完全に分離することはできないことには注意しなければならない。ここでは、第1段階として、ディフラクション効果がどの程度減揺効果を持っているかを明らかにするために次のような数値実験を試みた。

図-10のように、基準浮体前部に防波堤を想定したL字型の固定構造体を配置する(case-b)。このL字型構造は減揺構造(case-a)と同じサイズを持つものである。この場合にはL字型構造はディフラクション効果だけを有し、ラディエーションによる減揺効果は失われる。図-11に数値実験結果を示した。L字型防波堤を設けた浮体では、浮体前端では減揺効果が生じるものの、浮体中央部での効果は大きくないことがわかり、また、減揺構造を付加した場合に比較して、その低減や増大の程度も小さい。今回のモデルの場合には防波堤的なディフラクション効果による波力低減とは若干異なるということが結論される。

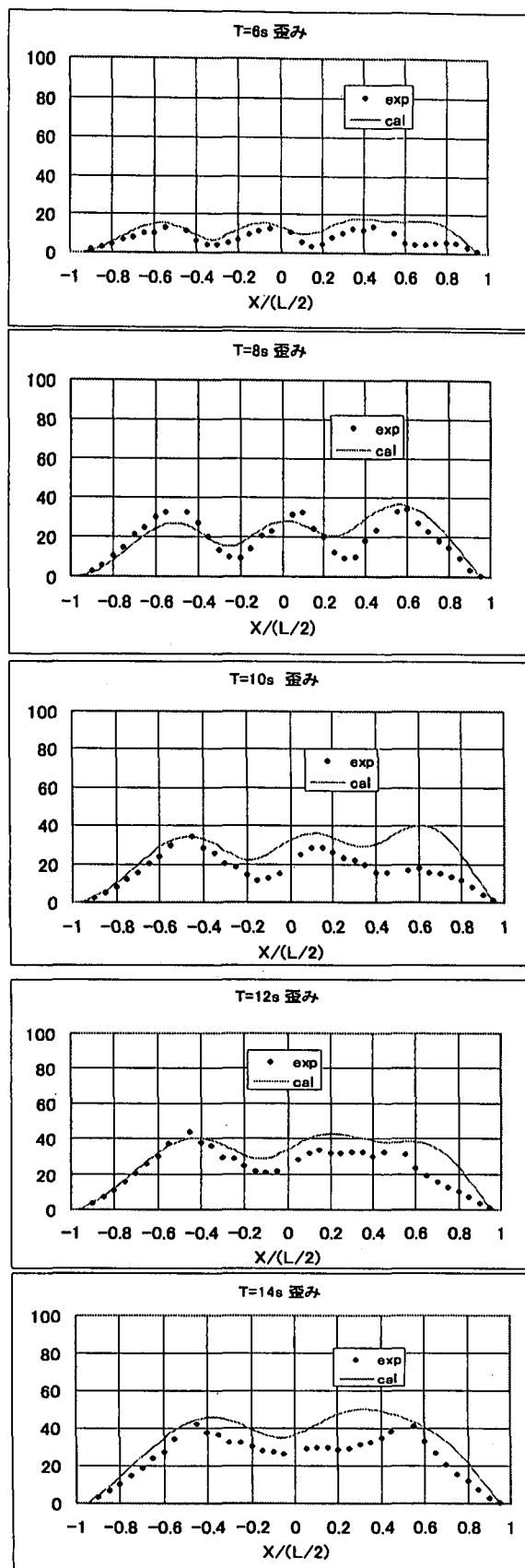


図-6 基準浮体歪み分布 (縦軸単位 μ/m)

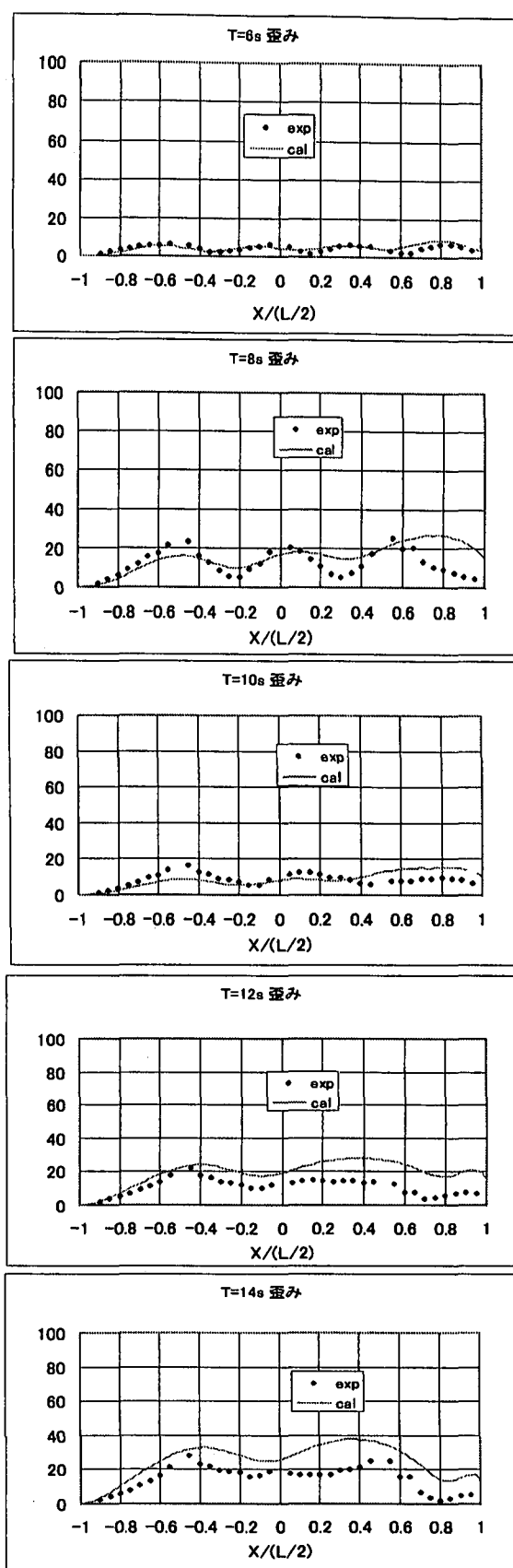


図-7 L字型減揺構造付き浮体歪み分布 (縦軸単位 μ/m)

5. 結言

本研究によって次の結論が得られた。

- 1) L字型の付加構造は減揺構造として効果的であり、長い周期でもその効果が高いのが特徴である。このことは実験によっても数値計算によっても確かめられる。
- 2) 実験値と数値計算の相関は全般的に良く、数値計算はL字型構造の効果をよく再現できる。
- 3) L字型減揺構造は上下方向たわみに関して、応答低減に効果的である反面、水平動揺や漂流力を増加させる影響を持つ。
- 4) L字型構造の減揺効果は、固定のL字型防波堤によるディフラクションの効果とは異なる。

今後、L字型減揺構造の諸元を変化させたときの数値計算をパラメトリックに行い、どのパラメータが応答の低減にどう作用するかを調べる必要がある。

謝辞：本研究はメガフロート技術研究組合との共同研究として行われた。また、鳥取大学工学部の上田茂教授、京都大学防災研究所の高山知司教授、港湾技術研究所の高橋重雄、平石哲也両氏には本研究遂行に関して貴重なご意見を頂いた。ご協力頂いた方々に謝意を表する。

参考文献

- 1) 前田久明他：ポンツーン型超大型浮体式海洋構造物の波浪中弾性応答に関する研究，日本造船学会論文集，第178号，1995。
- 2) 大松重雄：超大型ポンツーン型浮体の波浪中応答計算，日本造船学会 第182号，pp.329—340，1997。
- 3) K.Yago and H.Endo: Model Experiment and Numerical Calculation of the Hydrodynamic Behavior of Mat-like VLFS. *Proc. of Int'l Workshop on Very Large Floating Structures, VLFS'96*, 1996.
- 4) H.Ohta et al: Effect of Attachment of a Horizontal/Vertical Plate on the Wave Response of a VLFS, *Proc. of Int'l Workshop on Very Large Floating Structures, VLFS'99*, pp.265—272, 1999.
- 5) 飯島一博，鈴木英之，吉田宏一郎：超大型半潜式浮体の波浪中構造応答解析，日本造船学会論文集，第181号，pp.281—288，1997。
- 6) J.S.Goo and K.Yoshida: A Numerical Method for Huge Semisubmersible Response in Waves. *SNAME Transactions*, Vol.98. 1990.
- 7) H.Kagemoto and Dick K.P.Yue: Interactions among Multiple Three-Dimensional Bodies in Water Waves. *J.Fluid Mech.* Vol.166, 1986.
- 8) K.Iijima, H.Suzuki and K.Yoshida: Structural Design Methodology of VLFS from the Viewpoint of Dynamic Response Characteristics, *Proc. of Int'l Workshop on Very Large Floating Structures, VLFS'99*, pp.249—258, 1999.

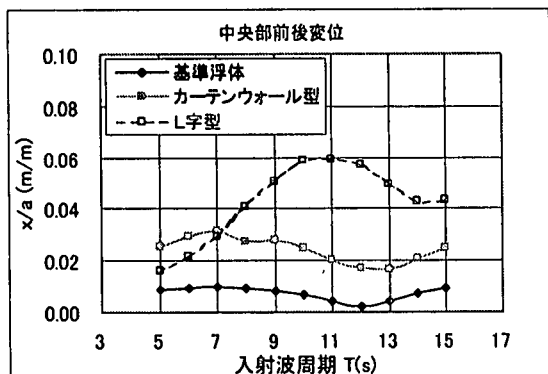


図-8 水平方向変位比較図

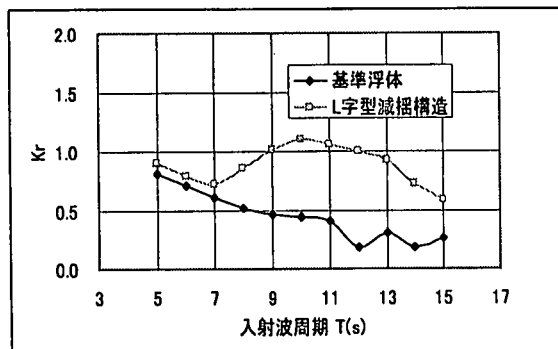


図-9 反射率比較図

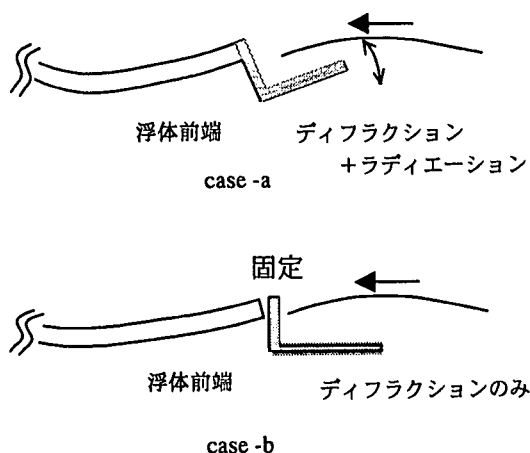


図-10 数値実験概略図

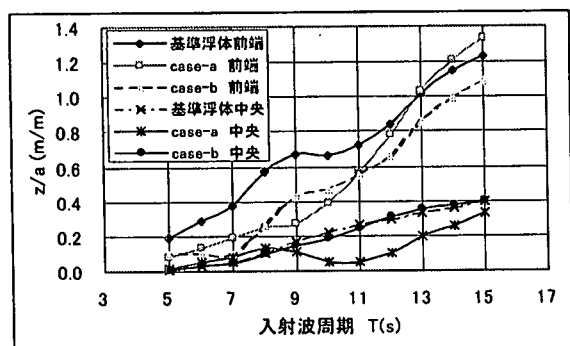


図-11 数値実験結果