

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1135

June 2006

剛性が不連続な超大型浮体の波浪中弾性応答計算
－剛性不連続部のモデル化に関する考察－

桃 木 勉
米 山 治 男
平 石 哲 也

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. 諸言	4
2. 水理模型実験と数値解析手法の概要	4
2.1 剛性不連続模型を用いた水理模型実験概要	4
2.2 VL10模型を用いた水理模型実験概要	5
2.3 数値計算法	6
3. 水理模型実験と数値解析の比較	10
3.1 VL10模型による波浪中応答問題	10
3.2 剛性不連続模型による波浪中応答問題	10
4. 数値解析による剛性不連続模型実験の検証	12
5. 結論	19
6. あとがき	19
謝辞	19
参考文献	19

Analysis of Elastic Response of Very Large Floating Structures with Discontinuous Stiffness in Waves - Study on the Modeling of Joint Part -

Tsutomu MOMOKI*
Haruo YONEYAMA**
Tetsuya HIRAISHI***

Synopsis

Recently, very large floating structures (VLFS) are proposed for use as an airport, disaster prevention basis and offshore wind power generation system, and so on. There are a lot of researches on hydrodynamic response of the VLFS in waves. However, it is necessary to research the influence of the discontinuity of the stiffness when the floating units of different types are connected with each other or the joints of floating units have a special shape.

In this research, we conducted the hydraulic model experiment on 1/50 scale, and analyzed the elastic response of the test model. The test model consists of many units. Since the joint part is made from aluminum components and bolts, it is difficult to obtain an exact solution from a traditional technique. We performed numerical analysis using VODAC (Very Large Floating Structure Oriented Dynamic Analysis Code) developed by University of Tokyo. Two kinds of beam FE-models are employed as a structural model; one is the model that arranges equivalent beam elements on the neutral plane, and the other the model that represents the deck, bottom and vertical wall using beam element individually.

We got that a stiffness change of floating body by joint part reduced the accuracy of the numerical analysis that used the equivalent beam elements model. In addition, we showed that the numerical analysis of high accuracy was possible by using a three-dimensional beam elements model.

Key Words: very large floating structure, elastic response, stiffness, joint part, modeling

* Researcher of Offshore Structures Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
** Head of Offshore Structures Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
*** Head of Wave Division, Marine Environment and Engineering Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan, Independent Administrative Institution Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5060 Fax : +81-46-844-0255 e-mail:momoki@pari.go.jp

剛性が不連続な超大型浮体の波浪中弾性応答計算

— 剛性不連続部のモデル化に関する考察 —

桃木 勉*
米山 治男**
平石 哲也***

要 旨

ここ数年、浮体式海上空港や防災基地、洋上風力発電など、超大型浮体構造の利用法について、さまざまな提案がされている。これに平行して超大型浮体の波浪中弾性応答問題についても、多くの研究が行われてきた。これらの研究の多くは局所的な剛性の変化は全体に比べると十分小さいとして、結合部などによる局所的な剛性変化を無視して検討されてきた。しかしながら結合部の形状が特殊なものや、異なる構造の浮体が結合されるような場合には、局所的な剛性の変化についても検討していく必要があると考えられる。

本研究では結合部において剛性が変化する超大型浮体の波浪中弾性応答を解明するために、1/50スケール浮体模型による水理模型実験及び数値解析を行った。実験で使用した模型は複数のユニットを結合して構成されている。ユニット間の結合部はアルミニウム角材やボルト等を用いているため、結合部分における極端な剛性の変化が存在し、従来の方法による数値解析では正確な解析が難しいことが予想される。本研究で行った数値解析では東京大学において開発された VODAC (Very Large Floating Structure Oriented Dynamic Analysis Code)を用い、その構造領域のモデル化においては、従来型の二次元的に梁要素を配置するモデルだけでなく、立体的に梁要素を配置するモデルについても検討を行い、剛性変化がある超大型浮体の波浪中弾性応答について検証を行った。

著者らは結合部等の影響により、浮体の剛性変化が大きな場合には、従来の鉛直方向の部材を無視した数値解析では計算精度が著しく低下することを確認し、結合部の鉛直部材まで考慮に入れて対象構造物をモデル化することにより、高い精度で数値解析が可能であることを示した。

キーワード：超大型浮体，弾性応答，剛性，結合部，モデル化

* 地盤・構造部海洋構造研究室

** 地盤・構造部海洋構造研究室長

*** 海洋・水工部波浪研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾技術研究所

電話：046-844-5060 Fax：046-844-0255 e-mail:momoki@pari.go.jp

1. 諸言

超大型浮体構造物は、埋め立て工法に対して工期が短いことや、浮力を用いた構造になっているため地震の影響を受けにくいこと、海底部を覆わないので環境への負荷が小さく、必要がなくなれば簡単に撤去できるなどの特徴がある。このような利点をもつ超大型浮体構造物の利用方法として、海上空港や浮体式防災基地、洋上風力発電所といった大規模施設への利用が幅広く検討されており、実現へ向けて様々な取り組みが行われている。

これまでにも超大型浮体の波浪中弾性応答問題に関する研究について、数多くの水理模型実験が実施されるとともに、様々な数値解析手法が開発されてきた。これらの研究の多くは、対象とする浮体構造物の規模が水平方向の数キロメートル四方に対して鉛直方向には数メートルしかなく、相対的に非常に薄い構造物となっているため、剛体としてではなく弾性体としての挙動を示すことが知られている。また、想定される浮体の大きさから一体としての建造は困難であるため、複数のユニットを洋上において結合して建造することが前提となっておりユニット間に結合部が生じる。特に超大型浮体構造物を実海域において実現する場合には、設置海域の地形や設置条件に合わせて複数種類の構造物で構成されることがあり、ユニット間の結合部や鉛直部材の剛性が全体の応答特性に影響する可能性がある。したがって、結合部の形状が特殊なものであったり、異なる構造のユニットが結合されたりするような場合には、波浪中弾性応答解析を行う場合に結合部における剛性の変化についても考慮する必要があると考えられる。

本研究では1/50スケール模型による水理模型実験とともに、飯島ら^{1~3)}によって開発されたVODAC(Very Large Floating Structure Oriented Dynamic Analysis Code)を用いた数値解析を行った。水理模型実験で使用した浮体模型は複数のユニットから構成され、その結合部はアルミ角材や板厚の異なるアルミ板など、複数の部材で構成されている。また、VODACについては後述するように、波浪中弾性応答解析を浮体領域と構造領域に別けて計算を行っているが、そのうち構造領域を複数の梁要素によってモデル化しており、梁要素に断面積や断面二次モーメント、ねじり剛性といった浮体構造物の断面形状の情報を与えることによって構造解析を行っている。この構造領域のモデル化について、鉛直方向の構造要素を考慮していない従来型の平面的な構造モデルと、鉛直方向の部材を考慮して梁要素を立体的に配置したモデルの二通りについて数値解析を行った。また、箱型の超大

型浮体構造物へのVODACの適用の妥当性と、結合部がない状態について検証を行うために、矢後ら⁴⁾が行った浮体模型(以下VL10模型と記す)による水理模型実験についても数値解析を行った。著者らはこれらの計算結果について実験結果との比較・検討を行い、剛性が不連続な超大型浮体構造物の波浪中弾性応答に関して接合部のモデル化を行う時の問題点について考察を行った。

2. 水理模型実験と数値解析手法の概要

2.1 剛性不連続模型を用いた水理模型実験概要

本研究における水理模型実験については港湾空港技術研究所の環境インテリジェント水槽において行っており、ここで使われた模型を剛性不連続模型と呼ぶこととし、実験結果と数値解析について検討を行った。実験の様子を写真-1に示す。

今回、用いられた浮体模型は全長3.1km、全幅510mの仮想実機から、750m×150mというサイズで一部分を抜き出した部分構造物を対象にしており、剛性不連続模型は抜き出された部分構造物の1/50模型となっている。浮



写真-1 実験概況

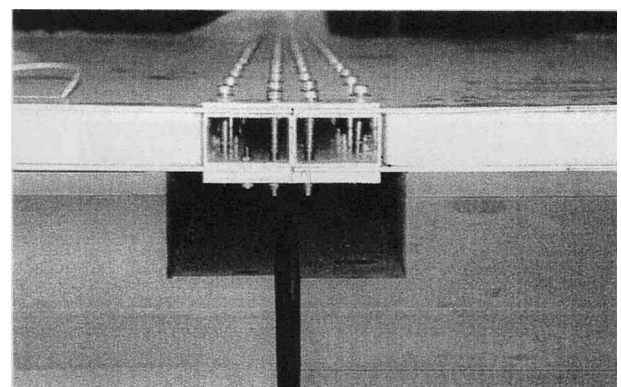


写真-2 剛性不連続模型のユニット結合部

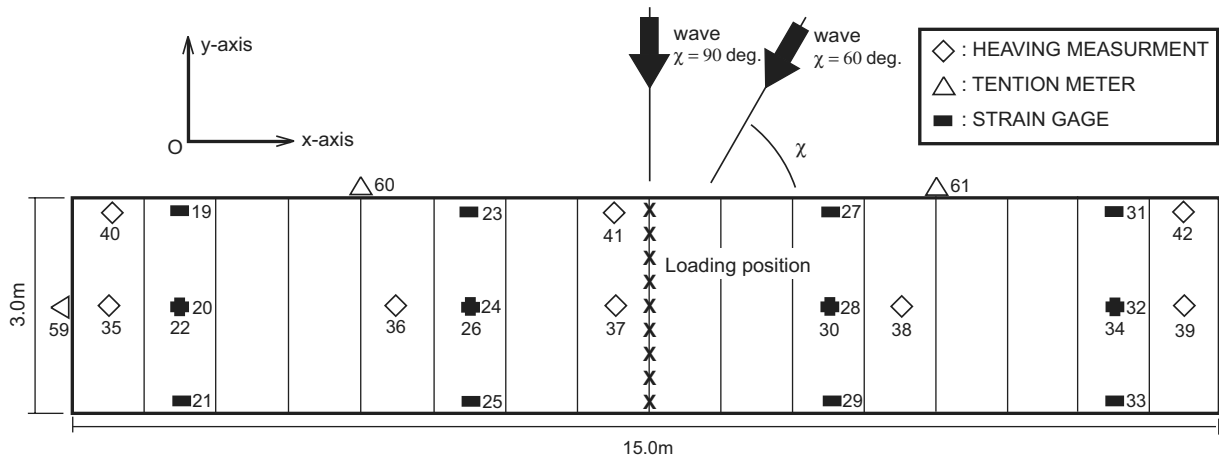


図-1 剛性不連続模型上の計測位置

表-1 剛性不連続模型の諸元

	模型諸元	実機諸元
模型のスケール	1/50	1/1
長さ $L(m)$	15.00	750.0
幅 $B(m)$	3.00	150.0
深さ $D(m)$	0.25	12.5
喫水 $d(m)$	0.03	1.5
単位幅当たりの剛性 EI/B (kNm^2/m)	1.06E+10	6.61E+08
水深 $H(m)$	0.40, 0.82	20.0, 40.75

表-2 VL10模型の諸元

	VL10	実機諸元
模型のスケール	1/30.770	1/1
長さ $L(m)$	9.750	300.00
幅 $B(m)$	1.900	60.00
深さ $D(m)$	0.545	2.00
喫水 $d(m)$	0.166	0.50
剛性 $EI(kg \cdot m^2)$	1.788E+03	4.87E+10
水深 $H(m)$	— 1.900	8.00 (58.50)

体構造物の緒元を表-1に示す。ここで、水深が二つ記されているが、これは入射波の波向が0度の場合には水深81.5cm、60度と90度の場合には水深40.0cmで実験を行ったことを意味している。また浮体模型は全長15.0mと非常に大きいために、市販されているアルミニウム部材の都合上、複数のユニットを結合して模型全体を構成することとした。また、ユニットの剛性を受け持つ部分は硬質発砲ポリエチレンを二枚のアルミニウム板で挟みこむサンドイッチ構造とし、このアルミハニカム板の下部に軟質発泡ポリエチレンの浮力材を接着している。ユニット間の結合状況については写真-2に示すようにアルミニウム角材によって補強されたユニット端部を上下から厚さの異なる二枚のアルミニウム板をあてがって、ボルト締めで固定する構造となっている。

次に水理模型実験で計測する各物理量について浮体模型上における位置を図-1に示す。それぞれの計測位置に記されている数字は計測時のチャンネル番号であり、本論文では計測位置の番号とする。

また、図-1上の細い縦線はユニット間の結合部を表しており、浮体模型は16個のユニットで構成されているこ

とを示している。今回使用した浮体模型にはこのように結合部があることから剛性の一様性が確保されていない。そのため、浮体の剛性について詳細な状況を確認するために静的載荷試験を行っている。図-1の浮体模型中央に×印で示されている所が静的載荷試験で荷重を加えた場所であり、載荷後に浮体模型の鉛直方向変位分布を計測している。

本研究ではTest conditionとして入射波高4.0cm(模型量)、波向0度、60度、90度、波周期8.0sec(現地換算量)の波を入射した時の結果を中心に議論する。以後、波周期については現地換算量、それ以外は模型量で表記する。

2.2 VL10 模型を用いた水理模型実験概要

本研究では、結合部の有無による検証を行うために、結合部がなく、剛性が水平方向に一樣な構造物についても検討を行った。解析対象としたのは矢後ら⁴⁾によって行われたVL10模型を用いた水理模型実験であり、VL10模型の諸元を表-2に、模型の断面図を図-2に示す。

図-2に示すようにVL10浮体模型は、その曲げ剛性を受け持つアルミハニカム板と、浮力材である発泡ポリエチ

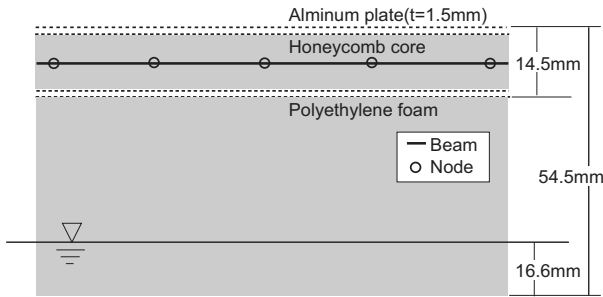


図-2 VL10 模型断面

レンとによって構成されている。また、アルミハニカム板を構成しているアルミニウム板は継目のない一枚板であり、そのためVL10模型は結合部がなく、剛性が水平方向に一様になっている。

詳しい計測位置やTest conditionについては矢後ら⁴⁾の論文を参照することとするが、本研究では $\lambda/L = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ の4つの波周波数及び波向0度, 60度, 90度の3方向の計12パターンについて検討を行うこととした。

2.3 数値計算法

(1) VODACの概要

本論文で用いている数値解析理論は飯島ら^{1~3)}によって開発されたVODAC (Very Large Floating Structure Oriented Dynamic Analysis Code)であり、ここではその概要を示す。

VODACについて流体領域では特異点分布法と影本の相互干渉理論⁵⁾が組み合わせて用いられ、構造領域ではFEMが用いられている。また図-3に示すように流体領域ではGroup bodyの概念が取り入れられ、構造領域については部分構造法を応用することで、より大きな構造物でも扱うことができるようになっている。

VODACは本来、半潜水式の大規模浮体の波浪中弾性応答解析に開発されたものであるが、矩形状の大規模浮体を多数の小さな矩形要素に分割して、これらの浮体要素間の相互干渉問題として解けば、箱型の大規模浮体構造物についての解析を行うことも可能である⁶⁾。構造領域及び流体領域のモデル化についてその概念を図-4に示す。

構造領域では多数の要素浮体で支持された浮体構造物について梁要素を使った骨組モデルでモデル化し、図-4(a)のように複数個の部分構造に分割する。それぞれの部分構造は他の部分構造と境界節点を介して結合されている。また、流体領域では構造物の没水部について図-4(b)のように複数の浮体要素で構成されているとし、さらにgroup bodyの概念を取り入れてモデル化を行って

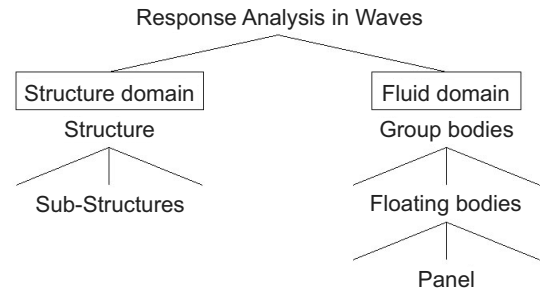


図-3 VODAC の概念図

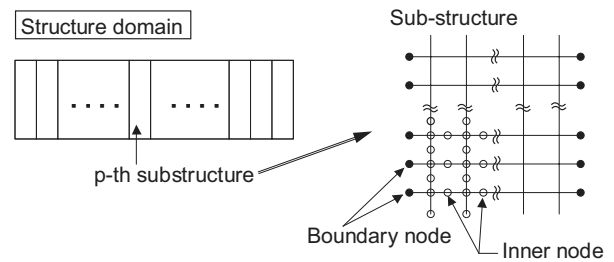


図-4 (a) 構造領域におけるモデル化の概念図

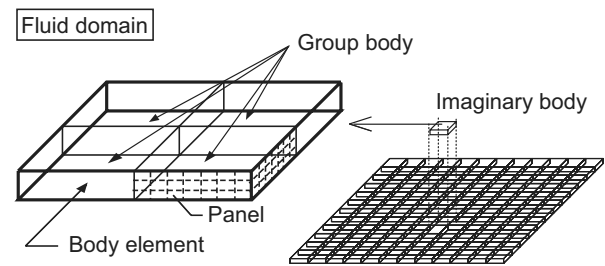


図-4 (b) 流体領域におけるモデル化の概念図

る。ここでgroup bodyとは近接するいくつかの要素浮体からなる流体力学的に一つのまとまりとみなされる単位のことを指す。またgroup bodyの概念は一つの要素浮体上のパネルだけでなく、近接する複数の浮体上のパネルにまで拡張するものである。

ただし、group bodyとその配置についてのいわゆる仮想円柱の仮定⁷⁾が設けられる。またgroup bodyは剛体として振舞うという仮定が設けられる。

(2) 解析理論

ここで通常の線形理論で用いられる仮定を設ける。流体は非圧縮、非粘性、非回転であると仮定し、自由表面は無限に広がっているものとする。また、水深は一定で、浮体の運動と入射波の振幅は微小であるとする。任意に配置された N 個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。

ある浮体要素 i によるdiffractionポテンシャルは次のように表される。

$$\phi_i^D = \iint_{S_i} \sigma G_i ds \quad (1)$$

ここで S_i は注目する浮体要素の浮体表面を表す。 σ は特異点の強さを表し、 G_i は水波についてのGreen関数である。このGreen関数は円筒関数の級数展開で表されるので、式(1)は次式のようになる。

$$\phi_i^D = \frac{\cosh[k_0(z+h)]}{\cosh k_0 h} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{0ni} H_n^{(1)}(k_0 r_i) e^{in\theta_i} + \sum_{m=1}^{\infty} \cos[k_m(z+h)] \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{mni} K_n(k_m r_i) e^{in\theta_i} \quad (2)$$

ここで $H_n^{(1)}$ は n 次の第一種ハンケル関数、 K_n は n 次の第二種ベッセル関数である。また k_0 及び k_m は波数であり、それぞれ次の式から求められる。

$$k_0 \tanh k_0 h = \omega/g = K \quad (3)$$

$$k_m \tan k_m h = K, \quad (m-1/2)\pi \leq k_m h \leq m\pi \quad (4)$$

式(2)のdiffractionポテンシャルは次のような行列表示に書き直すことができる。

$$\phi_i^D = \{A_i\}^T \{\psi_i^D\} \quad (5)$$

ここで $\{\psi_i^D\}$ はベッセル関数からなる散乱波の要素を表すベクトルで、 $\{A_i\}$ は浮体 i によるdiffractionポテンシャルの強さを表す係数ベクトルになっている。

同様に浮体 i が l 方向 ($l=1\sim 3$; 並進, $l=4\sim 6$; 回転) に単位振幅で動揺する際のradiationポテンシャルは次のように表すことができる。

$$\phi_{li}^R = \{R_{li}\}^T \{\psi_i^D\} \quad (6)$$

$\{R_{li}\}^T$ は ϕ_{li}^R について散乱波を表すベクトルの要素を用いて展開した場合の係数ベクトルの転置を表す。 $\{\psi_{pi}^D\}$ は Grafの加法定理を用いると次のように書き換えられる。

$$\{\psi_i^D\} = [T_{ij}] \{\psi_j^I\} \quad (7)$$

ここで $[T_{ij}]$ は座標変換行列であり、 $\{\psi_j^I\}$ はベッセル関数を用いて表される入射波ベクトルである。

従って、浮体 j に入射する全てのポテンシャルは

$$\phi_j^I = \phi_0 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \phi_i^D + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \sum_{l=1}^6 (-i\omega\eta_{li} \phi_{li}^R) = \left\{ a_j \right\}^T + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \left\{ A_i \right\}^T [T_{ij}] + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \sum_{l=1}^6 (-i\omega\eta_{li} \{R_{li}\}^T [T_{ij}]) \left\{ \psi_j^I \right\} \quad (8)$$

で表される。ただし、入射波ポテンシャル ϕ_0 は $\{a_j\}^T \{\psi_j^I\}$ で表されている。また η_{li} は浮体 i の l 方向への変位の複素振幅を表す。

ここで個々の要素浮体に着目した時に、入射と散乱に

ついて一定の関係がある。この関係は要素浮体単体の形状と周波数によってのみ決まり、要素浮体の配置には依存しない。この特性を表す散乱特性行列を $[B_j]$ のように表記する。散乱特性行列を介して、要素浮体 j に関する、入射と散乱の間には次の関係式が導かれる⁵⁾。

$$\{A_i\}^T = [B_j] \left[\{a_j\} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N [T_{ij}]^T \{A_i\} \right], \quad (j=1 \sim N) \quad (9)$$

同様に、要素浮体が動揺する場合には、次式が成立する。

$$\{A_i\}^T = [B_j] \left[\{a_j\} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N [T_{ij}]^T \{A_i\} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \sum_{l=1}^6 -i\omega\eta_{li} [T_{ij}]^T \{R_{li}\} \right], \quad (j=1 \sim N) \quad (10)$$

この関係式により没水浮体表面上での境界条件が満たされることになる。

速度ポテンシャル場が与えられている時、ベルヌイの定理から圧力 p を求め、没水しているhull要素の表面で積分すれば、この部分に働く荷重 F が求められる。 F は式(10)の関係を利用することで次式のように表される。

$$\{F\} = -i\rho\omega \{A_i\}^T [B_i]^{-T} \iint_{S_p} \left(\{\psi_i^I\} + \iint_{S_i} \{\sigma_i\}_B G_i ds \right) \mathbf{n} dS + \omega^2 [\mu] \{\eta\} + i\omega [\nu] \{\eta\} \quad (11)$$

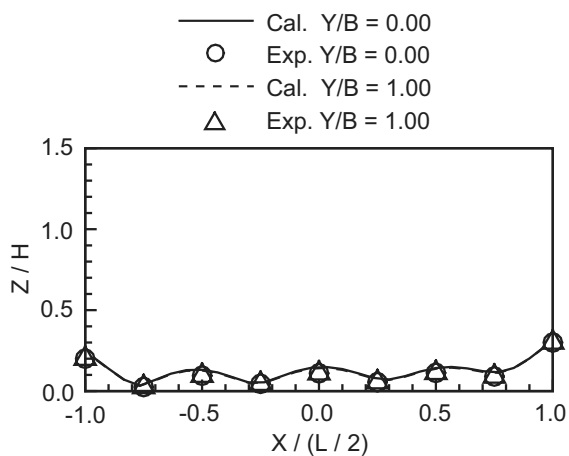
ここで $[\mu]$ と $[\nu]$ はこのhull部分に関する付加質量行列及び造波減衰行列である。 \mathbf{n} は一般化された方向余弦ベクトル、 $\{\sigma_i\}_B$ は、浮体単体で存在した時のdiffraction問題を解いて得られたsource密度分布を並べたベクトルであり、 $[B_i]$ を得る過程で既に求められている。

F より浮体構造物の運動方程式は次のように表すことができる。

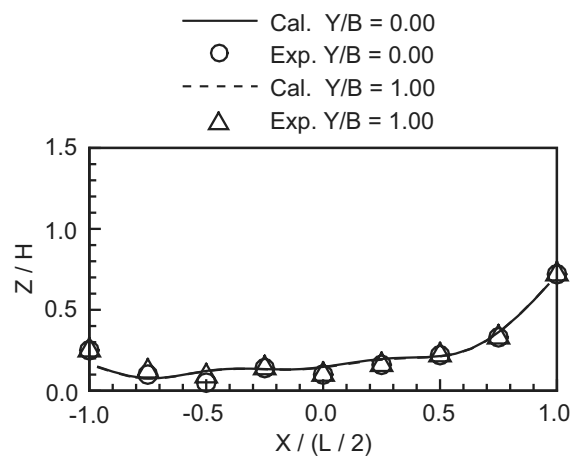
$$(-\omega^2 [M] - i\omega [C] + [K_r] + [K_s]) \{\eta\} = F \quad (12)$$

ここで $[M]$ は構造の質量マトリックス、 $[C]$ は構造減衰、 $[K_r]$ は静的圧力による復元力マトリックス、 $[K_s]$ は構造の剛性行列を表す。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。式(10)と式(12)を用いて、係数ベクトル A_i と η_{li} 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、外力と応答が同時に解かれる。この時に、group bodyの概念と部分構造法を適用することにより、未知数を減じて解析時間を短くすることができる。

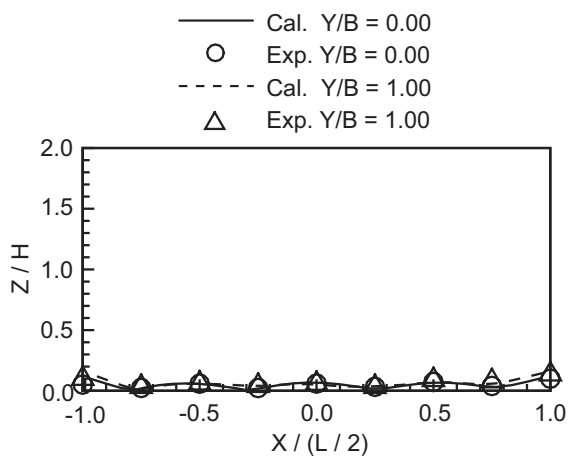
変位 η が求まると、各構造部材に働く部材力が計算され、また同時に得られている係数ベクトル A_i を合わせて用いることで漂流力、動的圧力、波高分布などが順次計算される。



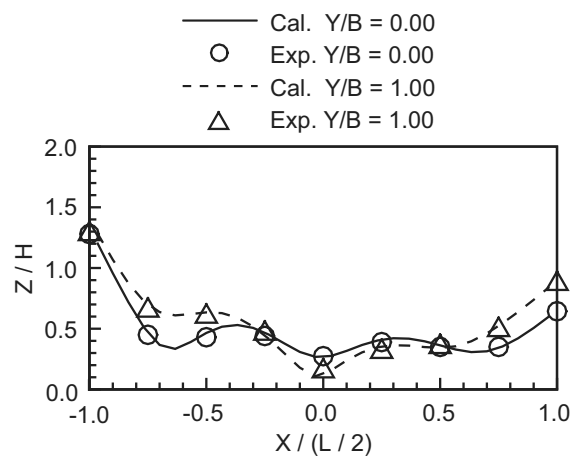
(a) 規則波・波向 0 度



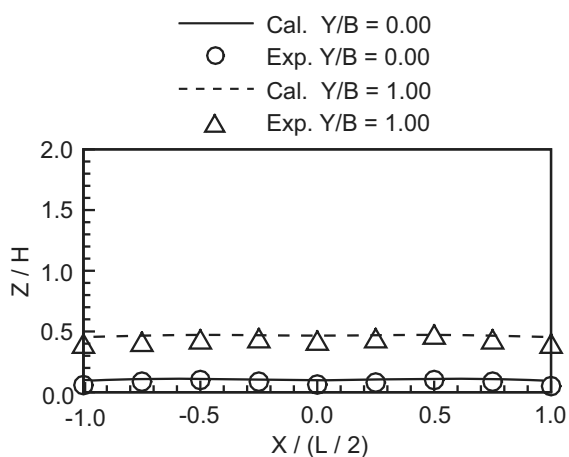
(a) 規則波・波向 0 度



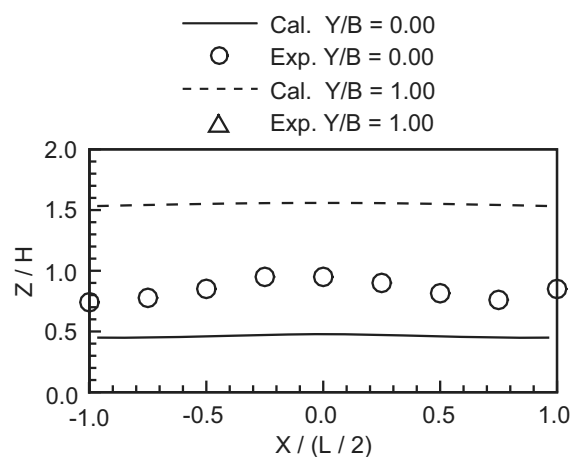
(b) 規則波・波向 60 度



(b) 規則波・波向 60 度



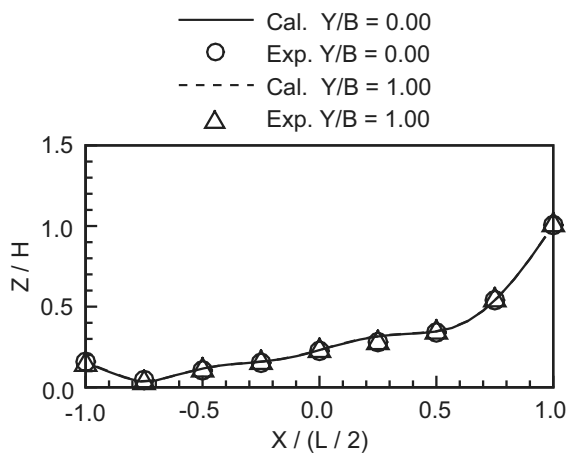
(c) 規則波・波向 90 度



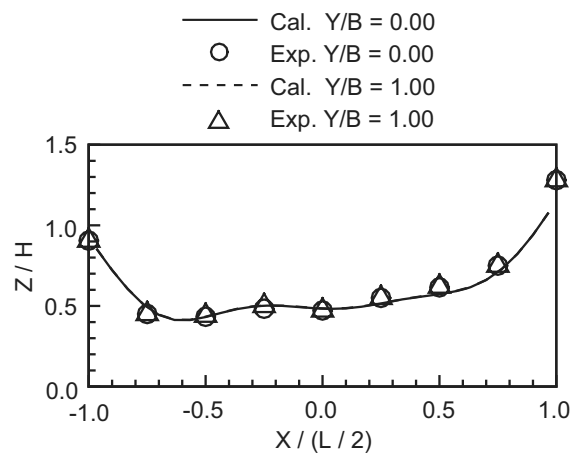
(c) 規則波・波向 90 度

図-5 VL10模型の応答振幅分布 ($\lambda/L = 0.1$)

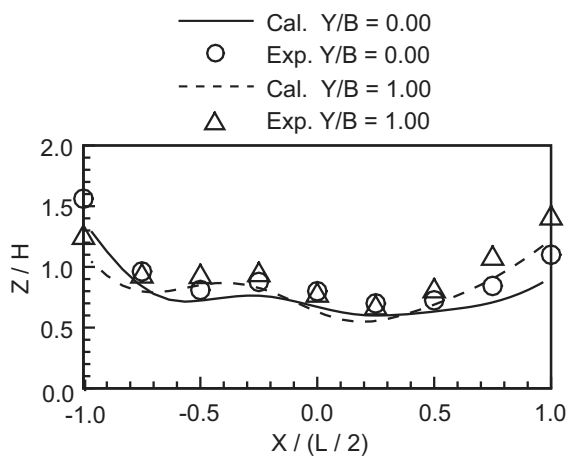
図-6 VL10模型の応答振幅分布 ($\lambda/L = 0.3$)



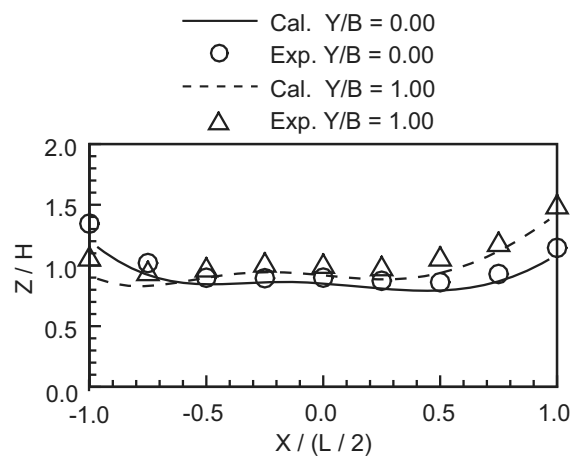
(a) 規則波・波向 0 度



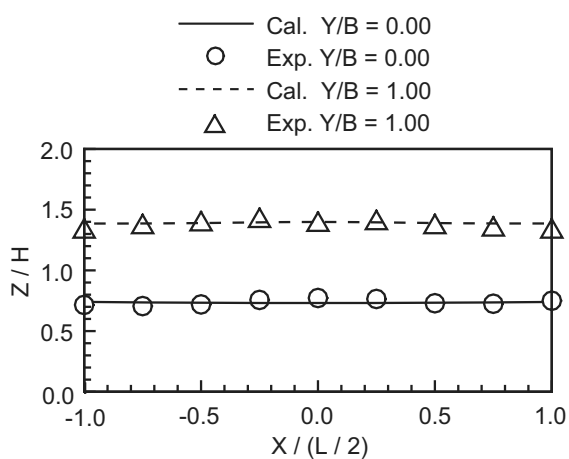
(a) 規則波・波向 0 度



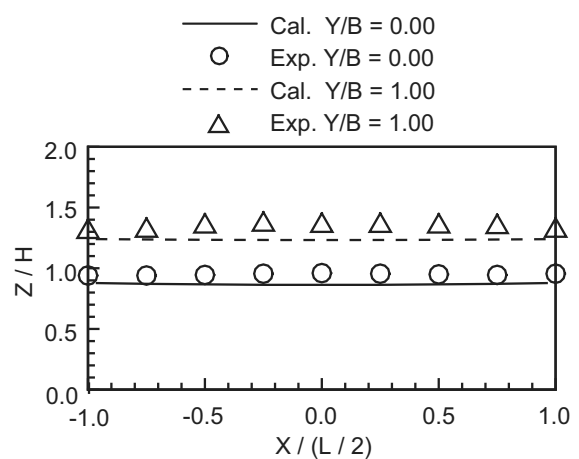
(b) 規則波・波向 60 度



(b) 規則波・波向 60 度



(c) 規則波・波向 90 度



(c) 規則波・波向 90 度

図-7 VL10模型の応答振幅分布 ($\lambda/L = 0.5$)

図-8 VL10模型の応答振幅分布 ($\lambda/L = 0.7$)

3. 水理模型実験と数値解析の比較

3.1 VL10 模型による波浪中応答問題

VL10模型の波浪中応答問題について数値解析を行うにあたって、構造部分のモデル化については図-2及び図-4(a)に示しているように剛性を受け持つアルミハニカム板を梁要素とそれを繋ぐ節点によってモデル化している。下部の浮力材については、アルミハニカム板に比べて剛性は十分小さく、全体剛性への寄与が無視できるとして、構造領域のモデル化では考慮していない。また、流体部分については図-4(b)に示しているように、複数の矩形浮体の集まりであると仮定し、group bodyの概念を取り入れてモデル化を行っている。

図-5～8に規則波中におけるVL10模型の応答振幅分布について示す。縦軸には応答振幅を入射波の波高で無次元化した値を、横軸には浮体模型上の位置を全長の半分で無次元化した値を示している。

図-5は入射波の波長が $\lambda/L = 0.1$ となる時の波浪中弾性応答の応答振幅で、上から順番に波向0度、60度、90度の時のグラフである。波向60度では応答振幅が0.1以下となるなど応答振幅自体が小さいこともあるが、入射波の向きにかかわらず、計算結果は実験結果とよく一致している。図-6は波長が $\lambda/L = 0.3$ となる波が入射した時の結果であるが、波向0度及び60度の時は実験結果と計算結果が良く一致している。ここで波向90度の時のみ実験結果と数値解析結果が大きく異なっているが、矢後らによって行われた数値計算でも波向90度の値については再現できていないことや、模型の横幅が小さく線形性の強い波向90度の現象において波周波数が $\lambda/L = 0.5$ の時よりも大きくなること、また計測位置によってばらつきが見られることから、原因は不明であるが実験データに何らかの問題があった可能性がある。図-7は入射波の波長が $\lambda/L = 0.5$ 、図-8は $\lambda/L = 0.7$ となる時のグラフであるが、波長 $\lambda/L = 0.5$ 、波向60度の時、及び波長 $\lambda/L = 0.7$ 、波向90度の時は計算結果のほうが実験結果よりも若干小さい値となっている。しかしながら、実験値と計算値の差は小さく、変化の傾向はよく一致していることから定性的には良い結果を示していると考えられる。また $\lambda/L = 0.5$ では波向0度、90度の時、 $\lambda/L = 0.7$ では波向0度、60度の時のいずれについても定量的にみて良い結果が得られている。これらのことから、VL10模型のように結合部がなく、剛性が一様であるという条件においては、構造領域を平面的な配置の梁要素モデルを用いてモデル化しても、VODACによる数値解析は十分な精度で計算できることを確認した。

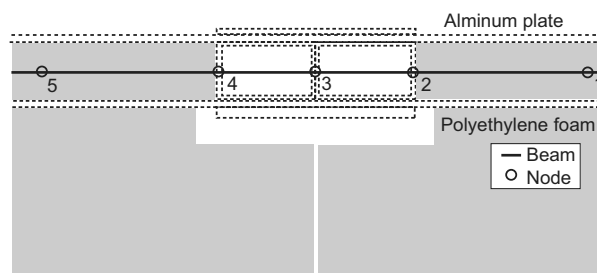


図-9 model1の断面図

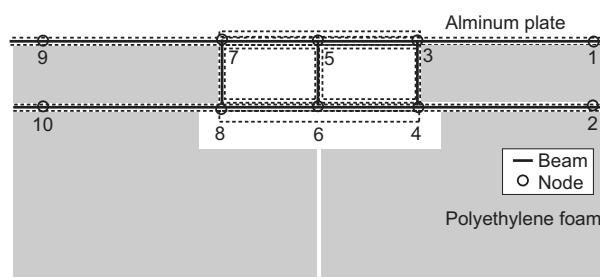


図-10 model2の断面図

3.2 剛性不連続模型による波浪中応答問題

(1) 模型のモデル化

次に港湾空港技術研究所で行った波浪中弾性応答の実験について数値解析を行うために、剛性不連続模型についてモデル化を行った。流体領域についてはVL10模型の時と同様、図-4(b)のように複数の矩形浮体の集まりであると仮定し、group bodyの概念を取り入れて浮力体没水部についてモデル化を行っている。

構造領域については今回の模型に対応して二通りの検討を行った。一つは図-9に示すようにアルミハニカム板からユニット間の結合部にいたるまでVL10模型と同様に水平方向の梁要素のみでモデル化したもので、これをmodel1とした。もう一つは図-10に示すように、アルミハニカム板の上下の板を個別の梁要素でモデル化するとともに、ユニット端部についてはアルミニウム角材の鉛直部分についても梁要素を用いるなど、3次元的な骨組み構造となっているもので、これをmodel2とした。ここで結合部において複数の板が重ねられている部分については一枚の厚い板と見なしている。また、アルミハニカム板の下部に浮力材として取り付けられている軟質発泡ポリエチレンについてはアルミハニカム板に比べて剛性が小さいことから、構造領域のモデル化では考慮していない。

超大型浮体構造物は水平面の広がりによって、構造物の厚さは非常に小さいことから、これまで行われてきた研究の多くは、model1のように水平方向の要素のみでモ

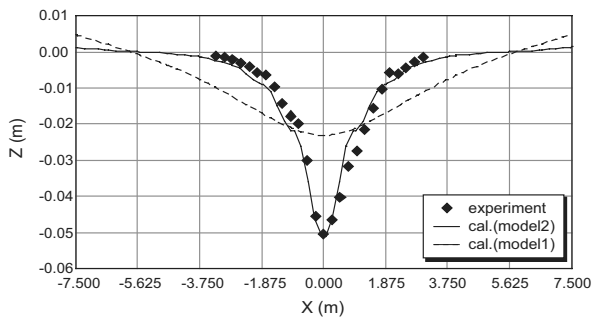


図-11 静的載荷試験

デル化されている。このmodel1ではアルミハニカム板の中央に梁要素を配置しており、梁要素にアルミハニカム板の断面積や断面二次モーメントといった断面形状の情報を入力し、結合部においても同様に断面形状の情報を与えている。しかしながら、節点2, 3, 4を通る鉛直部材についてはモデルの構造上、この鉛直部材の情報が与えられていない。

一方、model2ではそれぞれの部材一つにつき一本の梁要素で構造物をモデル化しており、梁要素に入力するデータはアルミニウム板の断面形状の情報である。ここで結合部における節点番号3-5, 4-6における梁要素については、重ねられたアルミニウム板を一枚の厚い板として断面形状のデータを入力している。また、節点番号3-4, 5-6, 7-8における鉛直方向の梁要素によってアルミニウム角材の鉛直部分の断面形状についてのデータが入力できるようになっている。

(2) 静的載荷試験

剛性不連続モデルには結合部があるため、水平方向の剛性が一様ではない。そこで、剛性不連続モデルがどのような剛性の分布を持っているのか、その特徴を確認するために静的載荷試験を行った。2. で述べたように浮体中央部、図-1上の×印に合計3010.56Nの重りを均等に配置することで荷重を加えた。その上でレーザー式変位計を浮体模型のCenter Line上に複数配置し、浮体模型の鉛直方向変位を測定した。また前項で構築した二つの構造モデルを用いて、水理模型実験と同様に静的載荷試験の数値解析を行った。その結果を図-11に示す。

図-11の縦軸は鉛直方向の実スケール変位、横軸は浮体中央をzeroとした時の浮体上の位置であり、単位は共にメートルである。また、図中の菱形は実験値、点線はmodel1を用いた時、実線はmodel2を用いた時の計算値を示している。

水理模型実験では荷重を加えられた中央付近において約5cmの変位が計測されたが、荷重点付近から全長の1/4

にあたる±3.75m付近になると、ほとんどzeroになっていることが分かる。また、変化の形状については結合部とアルミハニカム板の境目において変形状の傾きが変化している。

数値解析結果についても検証していく。model1による数値解析では変位の最大値が約2.3cmと実験値の半分以下であり、軸方向の剛性が全体的に実際よりも大きくなっているものと考えられる。また模型実験で得られたような結合部とアルミハニカム板の境目における変形状の傾きの変化が再現されていない。一方model2による数値解析では変位の最大値が実験値とほぼ一致するとともに、結合部付近における変形状の傾きの変化について再現できていることが確認できた。

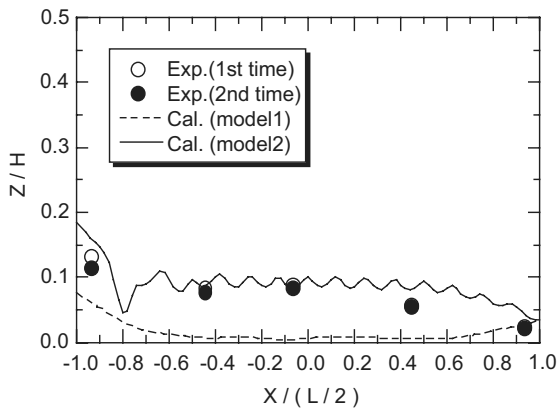
なお、水理模型実験で見られる変位の非対称性については結合部におけるボルトの締め具合が必ずしも均等でなかったために生じたものと考えられる。

(3) 波浪中弾性応答問題

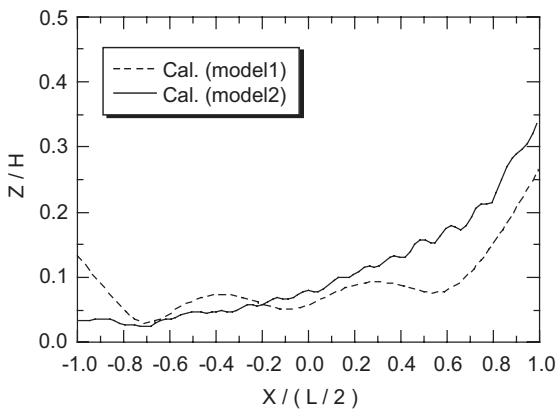
次に波浪中弾性応答問題について見ていく。図-12は波周期が8.0secの規則波が浮体に入射した時の浮体模型Center Line上における応答振幅の分布である。図-12(a)は入射波の波向が60度の時の実験値と計算値の比較を行ったものである。グラフの白丸、黒丸は模型実験の再現性を確認するために行われた二回の実験結果であり、図-1に示すpoint35, 36, ..., 39において計測した値である。点線はmodel1を用いた場合の計算結果、実線はmodel2を用いた場合の計算結果である。グラフからも分かるようにmodel1を用いた数値解析では、全体的に応答振幅が小さくなっており、波上側のpoint39を除けば実験値の半分以下となっている。また、浮体中央付近ではほとんどzeroに近い値を示しており、ほとんど動揺しないというシミュレーション結果になった。一方model2を用いた場合はpoint35, 38において若干大きな値がでていたものの、定性的には良い結果が得られている。

剛性が一様なVL10模型による波浪中応答解析では定量的にも良い結果が得られていたmodel1を、剛性不連続模型のように剛性が一様でない浮体構造物に適用すると数値解析精度が非常に悪いのは、静的載荷試験の結果からも分かるように、水平方向のみの梁要素によるモデル化では水平方向の剛性を十分に再現できないことが主な原因と考えられる。一方、静的載荷試験において変位の最大値や結合部における変形状の傾きの変化について再現できるmodel2を用いた数値解析では、高い精度で計算されていることが分かる。

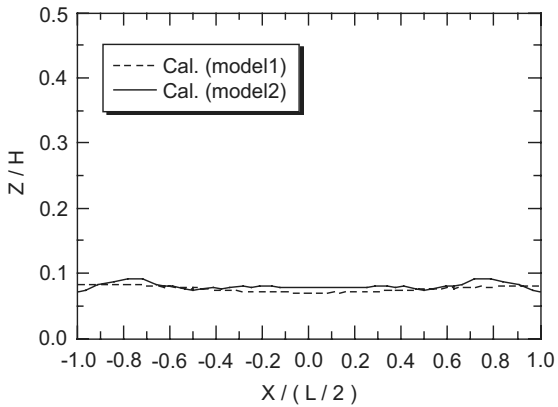
しかしながら、model2を用いた場合でも定量的にみると、完全には一致していない。これは数値解析モデルで



(a) 波向60度



(b) 波向0度



(c) 波向90度

図-12 剛性不連続模型 Center Line 上の応答振幅分布

は浮体模型の設計図通りモデル化を行うと剛性が左右対称になるが、浮体模型では静的載荷試験からも分かるように、その剛性の分布は左右対称にはなっておらず、このことが原因の一つと考えられる。また、今回使用した浮体模型の喫水は3.0cmと非常に小さいため、波高4.0cmよりも大きな入射波による実験では、目視による観測か

らも浮体模型の底面が水面を叩く現象が確認された。このことから、入射波高が4.0cmの実験においても、何らかの非線形性の影響が出ている可能性が考えられる。

また、ここで波向0度及び90度についても検討を行った。図-12(b)は、波向0度の時の応答振幅分布であるが、入射波の波向が0度の時だけ水深が81.5cmと他の波向の時よりも水深が深くなっている。静的載荷試験で求められた計算結果と同様に x 軸方向の剛性の再現性が悪いmodel1と再現性がよいmodel2とでは全く異なる結果となっている。図-12(c)は波向90度の時の浮体中央における応答振幅分布であるが、model1とmodel2ではほぼ一致していることが分かる。これは、剛性不連続模型が y 軸方向には結合部等による剛性が変化するような要因がなく、剛性が一樣であるためと考えられる。

4. 数値解析による剛性不連続模型実験の検証

前章において数値解析の精度について検証を行った結果、構造領域についてmodel2を用いて計算することにより、剛性が不均一な浮体構造物でも高い精度で計算できることが確認できた。ここでは、数値解析による剛性不連続模型の波浪中応答特性について検証を行った。

図-13に波周期8.0secの波が入射した時の数値解析によって求められた浮体の応答振幅分布の鳥瞰図を示す。ここで z 軸の目盛については水面をzeroとしており、単位はメートルである。また剛性不連続模型では剛性を受け持つアルミハニカム板の中心線の初期位置は0.205m、上端は0.220mとなっている。

図-13(a)、(b)ともに上段がmodel2、下段がmodel1を用いた場合の計算結果である。図-13(a)に波向60度の平面波が浮体に入射した場合の解析結果を示すが、浮体の応答振幅の分布についてmodel1を用いた数値解析では緩やかにしか変化していないのに対してmodel2を用いた場合には波打つように小刻みに変化するという計算結果になった。また波向90度の波が浮体に入射した場合を図-13(b)に示す。二つのモデルによる数値解析は、ほとんど同じ傾向の計算結果となっている。

次に図-14～図-17に、波周期が6.0、8.0、10.0、12.0secの時の数値解析によって求められた応答振幅の分布を、波向0度、60度、90度についてそれぞれ示す。ここで実線は浮体模型のCenter Line上、点線は浮体端部における動揺振幅を表している。また比較の為にmodel1を用いた場合の計算結果も合わせて示す。

これらのグラフを見ていくと、波向が0度の場合には、波上側の方が浮体の動揺振幅は大きく、波下側-0.5～-1.0

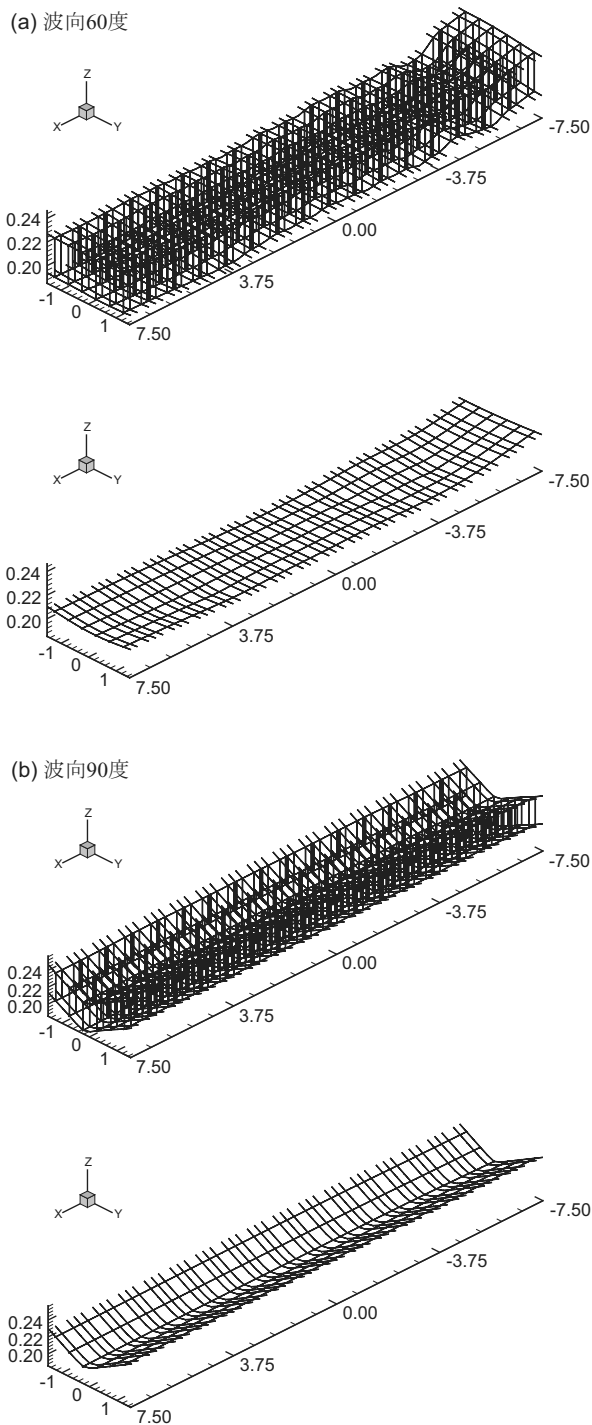


図-13 鳥瞰図 (波周期 8.0sec)

付近において一番小さくなっていることが確認できる。この傾向は図-14～図-17の全てにおいて確認できる。逆に波向きが60度の場合には、波下側の方が波上側のよりも動揺振幅は大きくなっている。また、model2を用いた数値解析では、浮体構造物が結合部付近ごとに細かく波打っている現象が見られる。これに対してmodel1を用い

た数値計算では、鉛直変位の分布について細かな変動はなく、また浮体中央付近の動揺はかなり小さくなっている。前章における図-12(a)の結果を考慮すると、model1による数値解析は全体的に実際の現象を過小評価している可能性がある。

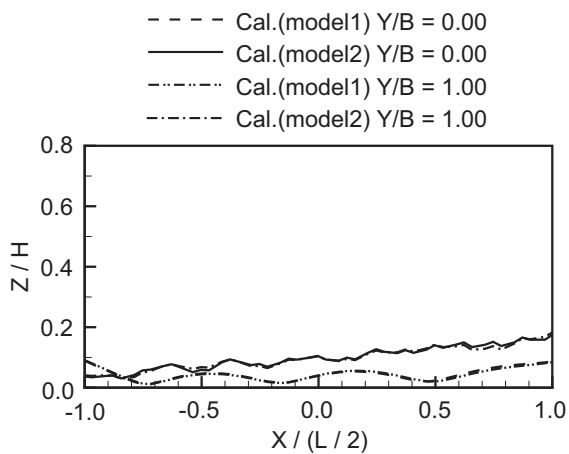
波向90度の場合には、model1, model2いずれを用いても計算を行っても、ほとんど差がないことが分かる。このことは前章でも述べたが、図-14～図-17について、いずれの波周期についても確認された。

図-18～図-20は図-1で示された各計測位置における計算結果であり、横軸に波周期、縦軸に応答振幅を入射波の波高で無次元化した値を示したグラフである。ここで図-18は浮体に対して入射波の波向0度の場合、図-19は波向60度の場合、図-20は波向が90度の場合のグラフである。ここでグラフ中の点線はmodel1, 実線はmodel2を用いた数値解析による応答振幅である。

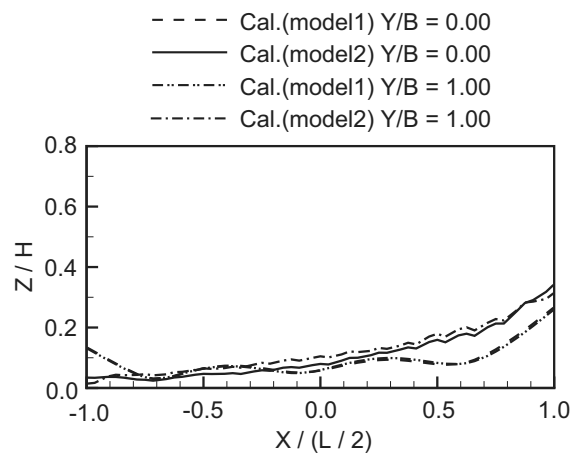
図-18を見ていくと波向0度の場合、波下側では波周期が大きくなっても、鉛直方向の応答振幅はほとんど大きくなっていないことが分かる。また、剛性の非一様性が影響しているためか、波周期の増減にともなう応答振幅の変化に規則性が見られない。一方、波上側にあるPoint39やPoint42では波周期が長くなるにつれて、応答振幅が大きくなっていることが分かる。ただし、model1を用いた数値解析による応答振幅はmodel2を用いた場合に比べて小さくなっている。

次に、波向60度の場合を見ていく。図-19に示すように波向が60度の場合には、model1及びmodel2のどちらを選択するかによって数値解析の結果が大きく異なっている。波下側のPoint35では入射波の周期が長くなることで振幅も大きくなっているが、model2では特に波周期が8.0secから10.0secの間に波浪中弾性応答の振幅が大きく増加している。これに対してmodel1では周期9.0secまでは応答振幅の増加が小さく、浮体はほとんど揺れていないが、それより周期が長い領域では応答振幅が大きくなり続け、周期13.0secではmodel2による計算値よりも大きな値を示している。次に浮体中心部付近にあたるpoint36～38を見ていく。model1, model2ともに波周期が長くなるにつれて浮体の動揺が大きくなっていることがシミュレートされているが、model1を用いた計算結果はmodel2を用いた計算結果に比べて応答振幅の値は半分以下しかなく、図-12の結果を考慮すると、かなり小さめの値しか得られていない可能性がある。ただし、波上側のpoint39, 42における二つのモデルの解析値は概ね一致している。

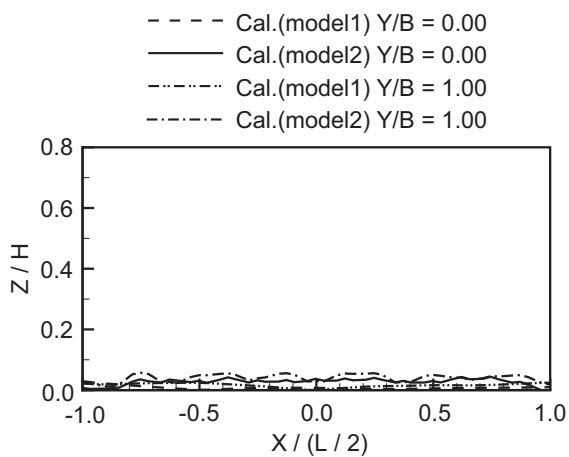
最後に浮体に対して入射波の波向が90度の場合を見ていく。図-20に示すようにmodel1, model2のどちらを用



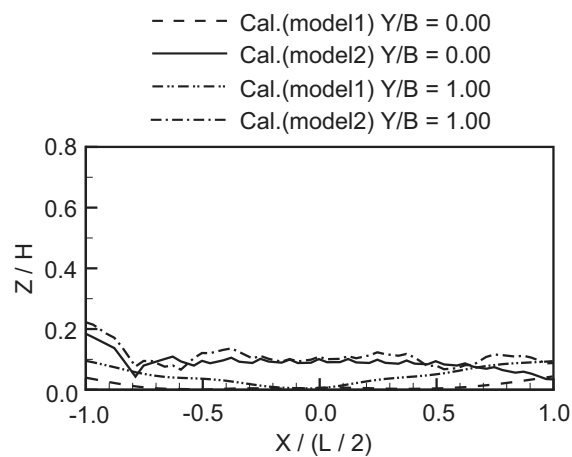
(a) 規則波・波向0度



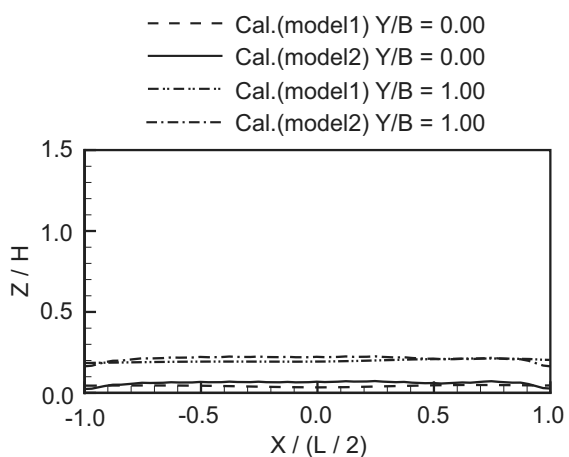
(a) 規則波・波向0度



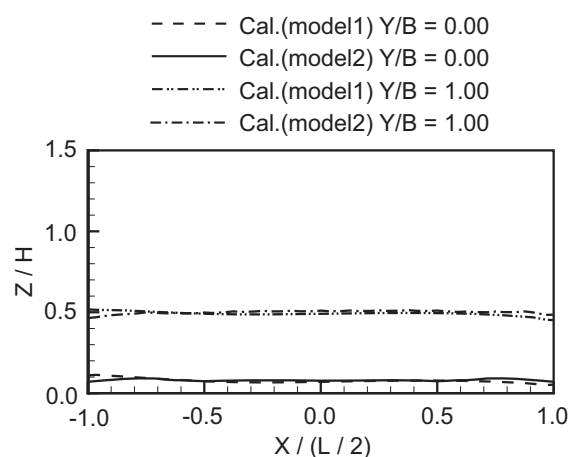
(b) 規則波・波向60度



(b) 規則波・波向60度



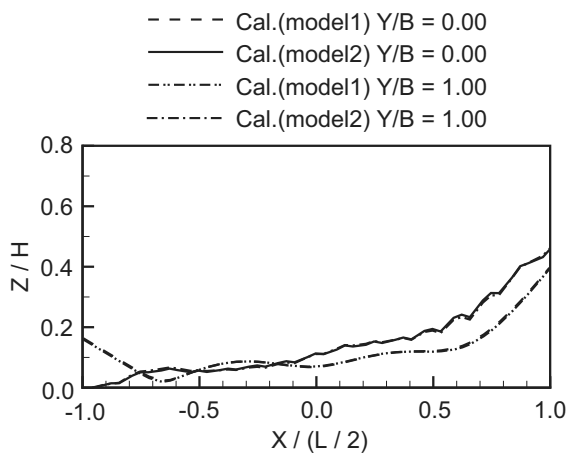
(c) 規則波・波向90度



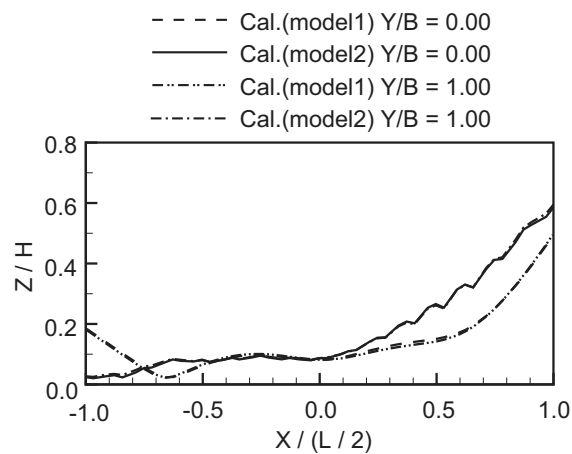
(c) 規則波・波向90度

図-14 剛性不連続模型の応答振幅分布 (周期6.0sec)

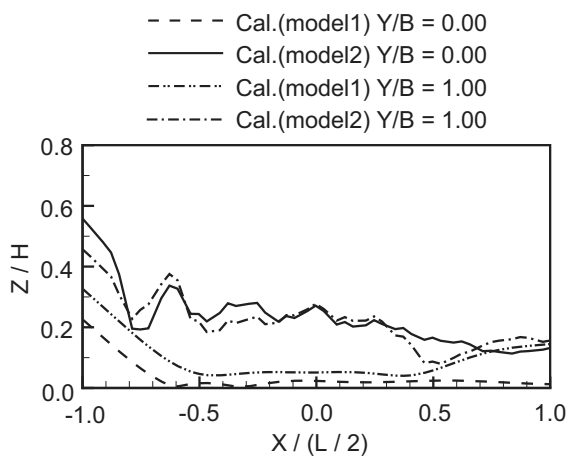
図-15 剛性不連続模型の応答振幅分布 (周期8.0sec)



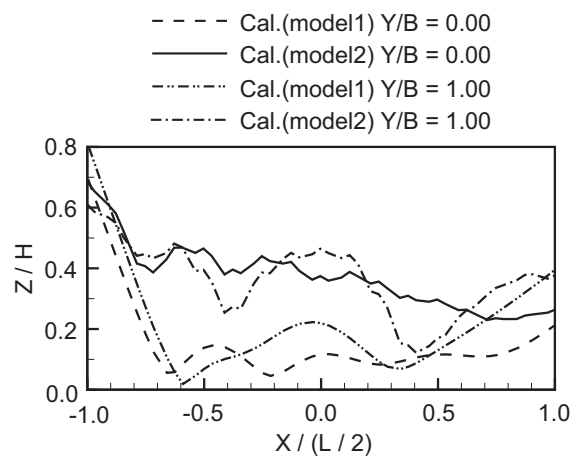
(a) 規則波・波向0度



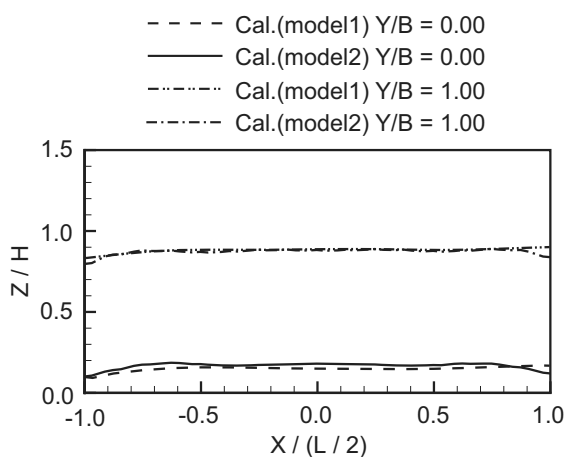
(a) 規則波・波向0度



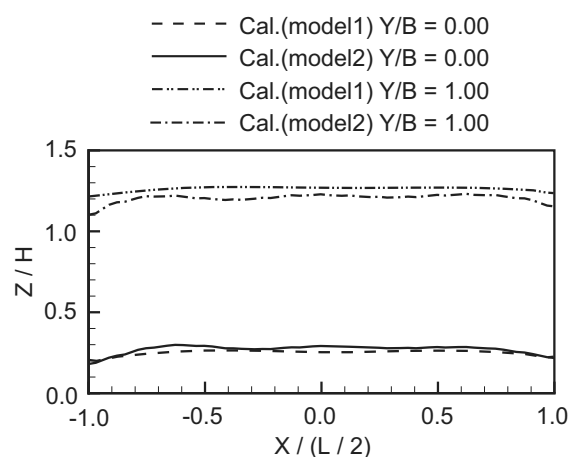
(b) 規則波・波向60度



(b) 規則波・波向60度



(c) 規則波・波向90度



(c) 規則波・波向90度

図-16 剛性不連続模型の応答振幅分布 (周期10.0sec)

図-17 剛性不連続模型の応答振幅分布 (周期12.0sec)

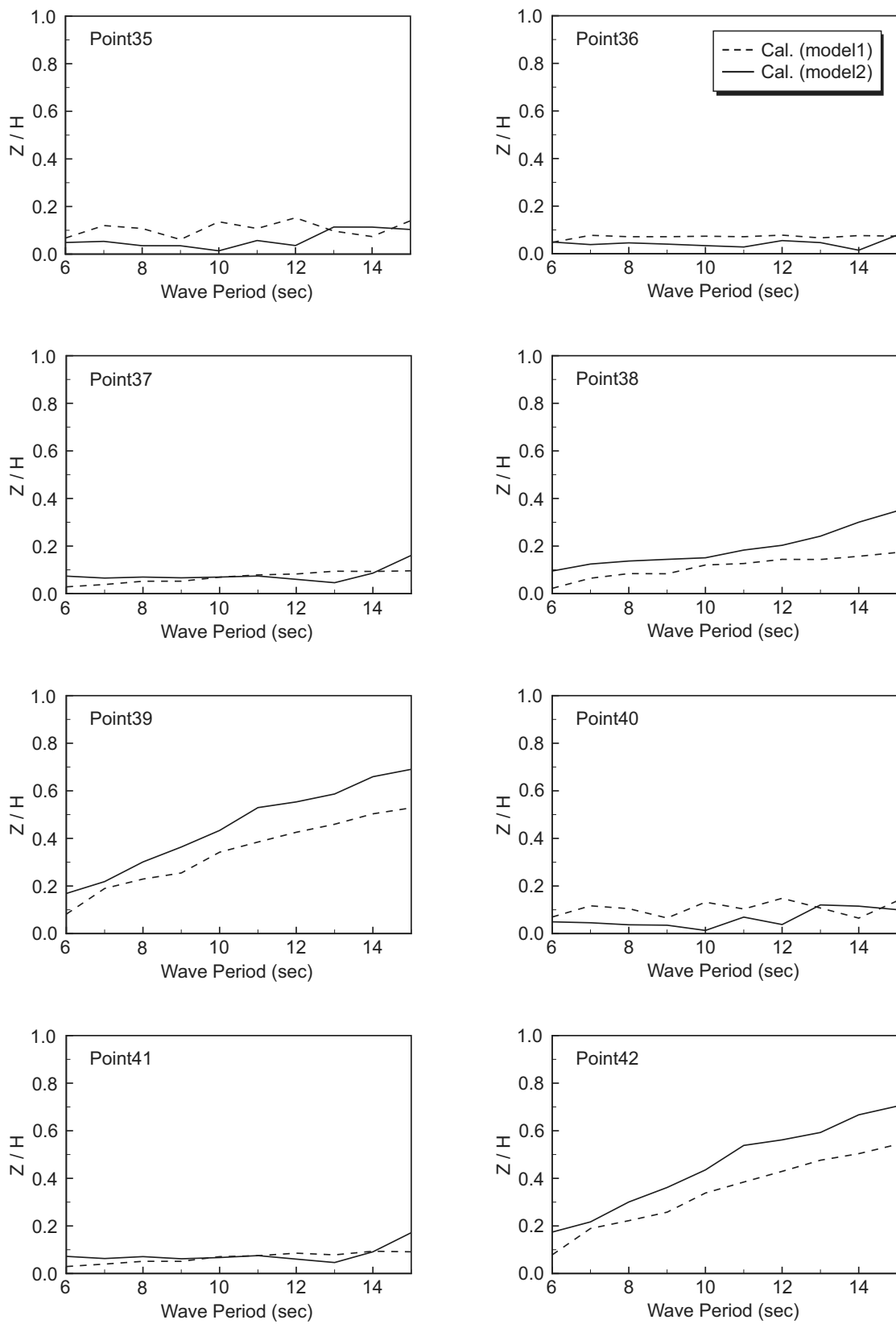


図-18 波周期ベースによる応答振幅 (波向 0 度)

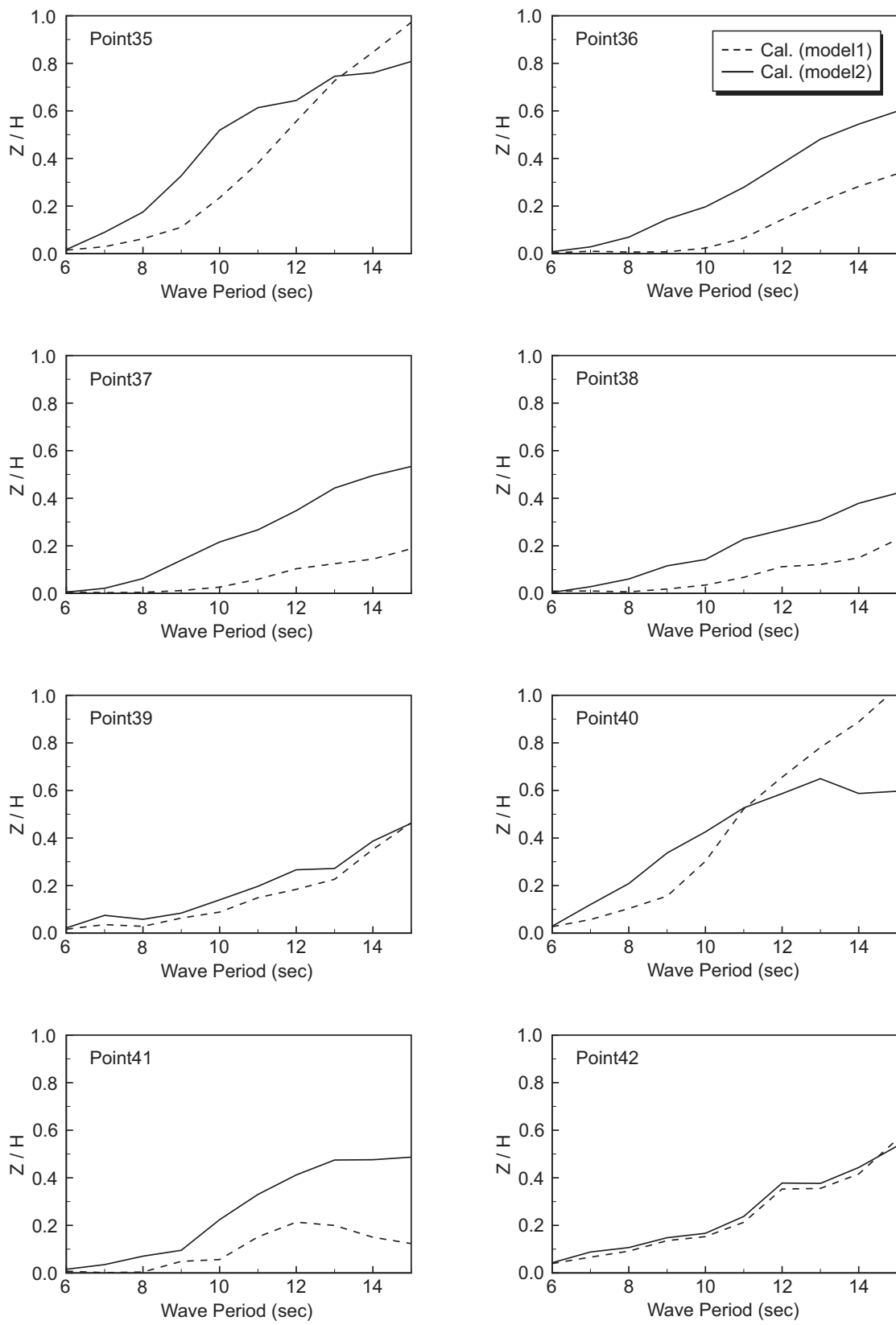


図-19 波周期ベースによる応答振幅 (波向 60 度)

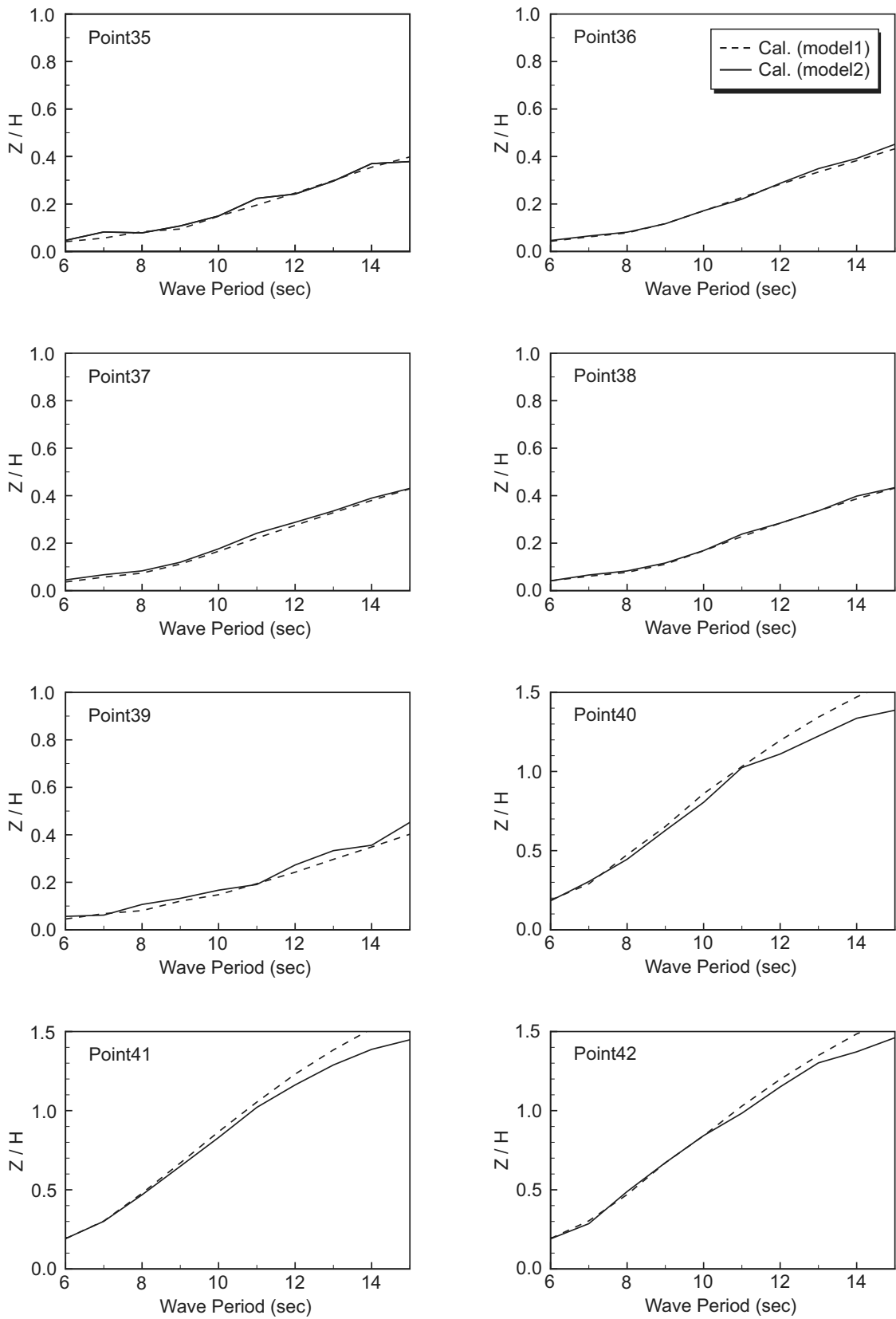


図-20 波周期ベースによる応答振幅 (波向 90 度)

いて数値解析を行っても、ほとんど同じ計算結果が得られた。これはここで用いた剛性不連続モデルがy軸方向にはユニット同士の連結がないことから剛性が一樣になっており、そのため構造領域のモデル化による差がほとんどないものと考えられる。また、剛性不連続モデルの幅は3.0mと比較的短いために、模型そのものが剛体に近い運動を行っていることが予想される。ここで数値解析に用いているVODACは線形の範囲では厳密なものであり、数値解析の結果も波周期の増加に対して応答振幅が一定割合で増加していることから、剛性不連続モデルにおける波向90度の数値解析は高い精度で計算されていることが推測される。

以上のことより、剛性不連続モデルにおける入射波の波向が90度の場合は、モデル化の違いによる計算結果について差異は見られなかったが、0度及び60度の時はmodel1とmodel2では計算結果が大きく異なる結果が得られることが分かった。model1を用いて数値解析を行った結果は全般的にmodel2を用いて数値解析を行った場合に比べてかなり小さな値を示していることが確認され、3.で検証した計算精度を考えると、剛性が不連続な浮体構造物に対してmodel1による数値解析は実現象よりも過小評価している可能性が大きい。

5. 結論

超大型浮体構造物について、梁要素を用いた立体骨組構造でモデル化するような数値解析手法を用いる場合には、以下のような結論が得られた。

- 1) 剛性が水平方向に一樣な浮体構造物については、水平方向の梁要素だけで構築された構造モデルを用いても、定量的に高い精度で数値解析を行うことができる。
- 2) 極端に剛性が変化するような連結部の存在は、型深さに対して水平方向に長大な超大型浮体構造物であっても、水平方向の梁要素のみによる構造モデルでは十分な精度を求めることができない場合があるので注意を要する。
- 3) 結合部等によって剛性が一樣でない構造物についても立体的に梁要素を配置することにより、構造領域のモデル化をより厳密に行えば、定量的に高い精度で数値解析を行うことが可能である。
- 4) 本研究で用いた剛性不連続モデルは長手方向に剛性が非一樣なモデルであるが、周期が長くなるにつれて浮体の動揺が大きくなる傾向は数値解析によって再現された。ただし、水平方向の梁要素のみによる2次元

的な構造モデルは3次元的な梁要素モデルによる解析結果よりも動揺量が小さめの結果しか得られておらず、入射波の条件や計測位置によっては2倍以上も異なるなど、構造領域のモデル化の違いによる数値解析への影響は顕著である。

- 5) 浮体の型深さに対して長さや幅が極端に大きな超大型浮体構造物であったとしても、剛性が不連続な結合部が存在するなどの理由により剛性が非一樣となるような構造物について数値解析モデルを構築するには、鉛直方向の部材も含めて構造領域の正確なモデル化を行うことが必要となる場合がある。

6. あとがき

これまでポンツーン型の超大型浮体構造物において、鉛直方向部材や結合部による剛性の不様性については影響が少ないとされ、ほとんど検討されてこなかった。本研究では結合部などの影響により水平方向に剛性が一樣でない超大型浮体構造物について検討し、数値解析においてその影響は無視できないことを示した。

超大型浮体構造物のように大規模実験が難しい対象構造物に対しては数値解析が有効な手法の一つで、設計のための構造計算を行う必要性を考えれば、本研究の成果は極めて重要であり、結合部などの影響により水平方向に剛性が一樣でない場合については鉛直方向の部材を考慮するなど、超大型浮体構造物の構造計算を行う際の参考情報を示したと考える。

(2006年2月10日受付)

謝辞

本研究を進めるにあたり、東京大学の鈴木英之教授および大阪大学の飯島一博助手には多大なるご助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 飯島一博・吉田宏一郎・鈴木英之：超大型半潜水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，1997年，pp. 281-288.
- 2) 飯島一博：超大型半潜水式浮体の波浪中応答解析と構造形態が構造応答に与える影響，博士論文，1997年.
- 3) 飯島一博・白石悟・珠久正憲・井上俊司・田中一郎：付加構造物による大型浮体の弾性応答低減，港湾技術研究所報告，第40巻 第2号，2001年，pp. 45-70.
- 4) 矢後清和・遠藤久芳：浅喫水箱型浮体の波浪中弾性応

答について, 日本造船学会論文集, 第180号, 1996年,
pp. 341-352.

- 5) KAGEMOTO, H. and YUE, Dick K. P. : Interaction among multiple three-dimensional bodies in water waves, *J. Fluid Mech.*, Vol.166, 1986, pp.189-209.
- 6) IJIMA, K. , YOSHIDA, K. and SUZUKI, H. : Structural Design Methodology of VLFS from the viewpoint of Dynamic Response Characteristics, *VLFS'99*, Vol.1, 1999, pp.249-258.
- 7) GOO, J. S. and YOSHIDA, K. : A Numerical Method for Huge Semisubmersible Response in Wave, *SNAME Transaction*, Vol.98, 1990.

港湾空港技術研究所資料 No.1135

2006.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発 行 所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL.046(844)5040 URL.http: www.pari.go.jp

印 刷 所 ニッセイエプロ株式会社

Copyright© (2006) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。