

国土交通省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

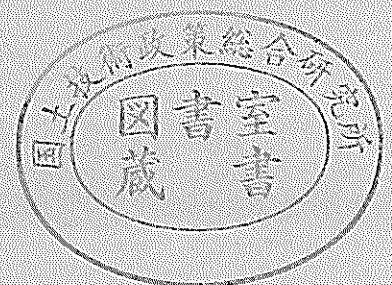
MINISTRY OF LAND, INFRASTRUCTURE AND TRANSPORT

VOL.40

NO.2

June 2001

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I.)

第 40 卷 第 2 号 (Vol. 40, No. 2), 2001年6月 (June 2001)

目 次 (CONTENTS)

1. 浚渫泥土を利用した貧配合セメント処理土の力学特性および材料特性
..... 渡部要一・土田 孝・引屋敷英人・古野武秀 3
(Mechanical and Material Properties of Dredged Soil Treated with Poor Quantity of Cement
..... Yoichi WATABE, Takashi TSUCHIDA, Hideto HIKIYASHIKI,
and Takehide FURUNO)

2. 分割型圧密試験による構造を有する洪積粘性土の圧密挙動
..... 姜 敏秀・土田 孝・渡部要一・田中洋行・宮島正悟 23
(Consolidation Behavior of Osaka Pleistocene Clay with Well-developed Structure by
Separated-type Consolidometer of High Capacity
..... Minsoo KANG, Takashi TSUCHIDA, Yoichi WATABE,
Hiroyuki TANAKA and Shogo MIYAZIMA)

3. 付加構造物による大型浮体の弾性応答低減
..... 飯島一博・白石 悟・珠久正憲・井上俊司・田中一郎 45
(Response Reduction of Hydroelastic Response of Large Floating Structures in Waves
by Use of Attachment
..... Kazuhiro IJIMA, Satoru SHIRAISHI, Masanori SHUKU,
Syunji INOUE and Itirou TANAKA)

付加構造物による大型浮体の弾性応答低減

飯島 一博*・白石 悟**・珠久 正憲***・井上 俊司***・田中 一郎****

要 旨

浮体が大型化するにつれて剛体的な浮体動揺は小さくなっていく一方で、弾性応答が卓越する。その結果、曲げモーメントなどの断面力が過大になり、構造安全性上の制約から設計時の限界波高が数メートル程度以下になる可能性がある。そこで、特に曲げモーメントなどの断面力が大きくなる10秒前後の比較的長周期の波浪中の応答を低減する必要があると考えられる。本研究では、浮体前端に鉛直壁型、L字型、スロープ型の構造物を付加することで、大型浮体の弾性応答を低減させることを試みた。

二次元水路内で水理模型実験を行い、これら付加構造物による弾性応答の低減効果を確認した。L字型あるいはスロープ型構造物を付加した場合には、長周期側でも応答低減が可能であることがわかった。また、数値解析手法の精度検証を行い、良好な結果を得た。この数値解析手法を用いて、L字型構造物を付加した場合の弾性応答低減のメカニズムについて考察を行った。

その結果、L字型構造物を付加することによる弾性応答低減は主として、L字型付加構造物とそれに引き続く浮体部での波強制力の位相的な打ち消し合いによってもたらされていること、L字型付加構造物の没水水平部長さの6~7倍の長さの波長の波に対して、応答低減の効果が大きいこと、上下方向変位を低減することができる反面、係留系の設計荷重として重要な漂流力は増加することが明らかとなった。

さらに、長周期側で効果のあるL字型の付加構造物と短周期側で効果のある鉛直壁型の付加構造物とを複合して付加することで、広い周期に渡って効率的に大型浮体の弾性応答が低減できることが示された。

キーワード：大型浮体、流力弾性、応答低減、付加構造物、鉛直壁、L字型、スロープ

* 構造部海洋構造研究室

** 構造部海洋構造研究室長

*** 三菱重工業(株)

**** 川崎重工業(株)

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省港湾技術研究所

電話：0468-44-5032 Fax：0468-44-4161 e-mail:iijima@cc.phri.go.jp

Response Reduction of Hydroelastic Response of Large Floating Structures in Waves by Use of Attachment

Kazuhiro IJIMA*
Satoru SHIRAISHI**
Masanori SHUKU***
Shunji INOUE***
Ichiro TANAKA****

Synopsis

As the dimension of floating structure increases, hydroelastic response can not be neglected while the response as a rigid body decreases. The bending moment of the deck structure becomes very large due to the hydroelastic response and the wave height is limited to 4 or 5 meters from the viewpoint of structural design. Therefore, the hydroelastic response, especially in longer wave period at which the structural response becomes large, must be reduced for its application to rougher sea area. In the present study, attachment structures, i.e. vertical wall type, L-shape type and slope type, are investigated for this purpose.

First, the hydraulic model tests were carried out. It turned out that the L-shape type attachment and the slope type attachment are effective in longer period. The numerical analysis shows good agreement with the experimental result.

Second, the mechanism of the hydroelastic response reduction of the large floating structure by use of the L-shape type attachment was investigated by employing the numerical analysis. The most important element proved to be the force cancellation effect at around the attachment. It is also shown that the drifting force becomes large while the vertical quantities are reduced.

In the last part of the paper, it is proposed to use the hybrid attachment. It means that the L-shape type attachment effective for the longer period and the vertical-wall type attachment effective for the shorter period are used in combination.

Key Words : large floating structure, hydroelasticity, response reduction, attachment, vertical wall, L-shape, slope

* Research Engineer of Offshore Structures Laboratory, Structural Engineering Division

** Chief of Offshore Structures Laboratory, Structural Engineering Division

*** Mitsubishi Heavy Industry Corp.

**** Kawasaki Heavy Industry Corp.

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-468-445032 Fax : +81-468-444161 e-mail:ijjima@cc.phri.go.jp

目 次

要 旨	45
1. 結言	49
2. 水理模型実験及び数値計算手法の精度検証	49
2.1 実験の目的	49
2.2 水理模型実験概要	49
2.3 数値計算概要	50
2.4 結果の比較	51
3. 弾性応答低減のメカニズム	56
3.1 鉛直壁型付加構造物の弾性応答低減メカニズム	56
3.2 L字型付加構造物の弾性応答低減メカニズム	56
3.3 スロープ型付加構造物の弾性応答低減メカニズム	58
4. 三次元モデルでの解析	58
4.1 横波中の弾性応答低減効果	58
4.2 斜め波中の弾性応答低減効果	59
4.3 横波2中の弾性応答低減効果	60
4.4 波浪変形および波漂流力	60
5. 設計の観点からの考察	63
5.1 鉛直壁型付加構造物	63
5.2 L字型付加構造物	64
5.3 複合型付加構造物	65
6. 結言	66
謝辞	67
参考文献	67
付録	68

1. 緒言

ここ数年、大型浮体を用いた大水深海域利用の検討が行われている。これは浮体が浮力を用いた構造になっており、地震の影響を受けにくいこと、水深や海底地盤条件の影響を受けにくいこと、海底を覆わないので環境に優しいとされること、必要でなくなった場合に撤去できることなどが評価されているからである。

一方で、浮体は波浪などによる外力に常に晒されるために、防災基地・港湾や空港として用いる場合には特に波浪に対する応答が問題になる。船舶に代表される通常の浮体であれば剛体的な応答が主であるが、大型浮体の場合には相対的に構造が柔構造になり、弾性的な応答が卓越する。この観点から、大型浮体の波浪中弾性応答に関して精力的な研究がなされてきた¹⁻¹³⁾。その結果、箱形の大型浮体の場合には、構造安全性の点からの限界波高が数メートル程度となることがわかりつつある。これは内湾の波浪条件のやや厳しい海域では、浮体構造単独では構造的に成立しないことを意味しており、なんらかの方法で限界波高を大きくできるような対策を検討する必要がある。

限界波高を大きくするためには、防波堤で静穏海域を創出することや、浮体構造を北海などの海底石油掘削で用いられる形式の半潜水式とすることなどが考えられるが、条件によっては工費の上で不利になることもある。本研究では浮体寸法に比して小さな構造を浮体前端部に付加することによる弾性応答低減効果を期待する。ここで、検討する付加構造物は3種類とする。すなわち、鉛直壁型の構造、L字型構造、スロープ型構造である。付加構造物のない構造を基準浮体、鉛直壁型の付加構造物を有する浮体を鉛直壁型と呼ぶことにし、これにならって、それぞれL字型、スロープ型と呼ぶこととする。

すでに太田らが、付加構造物を用いて波浪中弾性応答の低減を試みている¹⁴⁾。彼らの研究で用いられているのは、鉛直壁型の付加構造と没水水平板型の付加構造であるが、応答低減メカニズムが明らかにされておらず、また、数値計算は実験結果を説明するに至っていない。

L字型やスロープ型の付加構造物は鉛直壁と没水水平板による応答低減の効果を併せ持つと考えられる。さらにスロープ型では砕波による減衰効果も期待される。そこで、本研究ではこれら新しい付加構造による弾性応答の低減効果を調べることで、数値計算を行うことで各種付加構造物による応答低減のメカニズムについて明らかにすることを目的とする。

2. 水理模型実験及び数値計算手法の精度検証¹⁵⁾

2.1 実験の目的

ここで行う実験の目的は、付加構造物による弾性応答の低減の効果そのものを検討すること及び、3.で弾性応答の低減のメカニズムを検討する際に用いる数値計算法の精度の確認のためである。

2.2 水理模型実験概要

港湾技術研究所大型水工実験場の二次元造波水路にて水理模型実験を行った。この水路は長さ30m、幅0.6mであり、水深は0.6mとした。有効波の考えから、浮体前からの反射波及び水槽後部からの反射波が再び浮体に入射しない範囲の時間で計測を行い、また、この時間が最も長くなるように、浮体を水槽中央部に配置した。

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
構造深さ $H(m)$		7.0	中実構造
等価板厚 $t(m)$		0.02	0.012

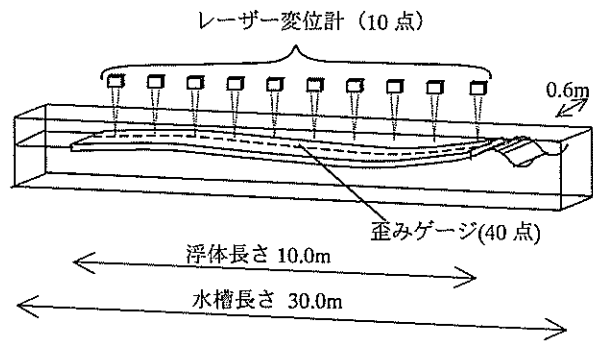


図-1 水理模型実験概略図

基準浮体の実験模型の主要寸法と概略図を表-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、浮力を得るための支持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、模型縮尺は実験精度を保

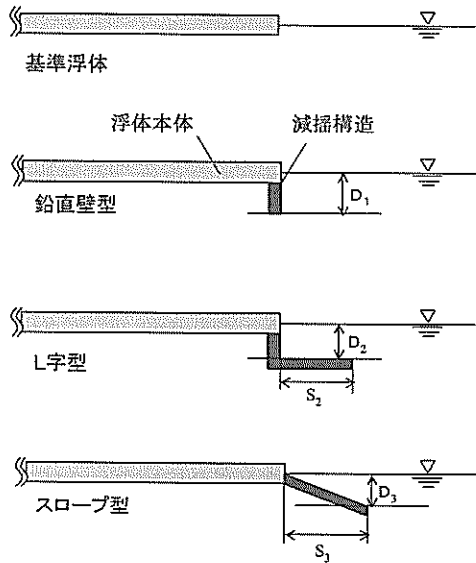


図-2 付加構造構造物形状

表-2 実験条件

id	構造説明	波浪条件
1	基準浮体	波高4mで周期6, 7, 8, ..., 14s 波高7mで周期8, 9, 10, ..., 16s
2	鉛直壁型, $D_1=4\text{m}$	波高4mで周期6, 7, 8, ..., 14s 波高7mで周期8, 9, 10, ..., 16s
3	L字型 $D_2=8\text{m}, S_2=12\text{m}$	波高4mで周期6, 7, 8, ..., 14s 波高7mで周期8, 9, 10, ..., 16s
4	スロープ型 (急) $D_3=4\text{m}, S_3=17.5\text{m}$	波高4mで周期6, 7, 8, ..., 14s 波高7mで周期8, 9, 10, ..., 16s
5	スロープ型 (急・延) $D_3=8\text{m}, S_3=35\text{m}$	波高4mで周期6, 8, 10, 12s 波高7mで周期8, 10, 12, 14s
6	スロープ型 (緩) $D_3=2\text{m}, S_3=17.5\text{m}$	波高4mで周期6, 8, 10, 12s 波高7mで周期8, 10, 12, 14s
7	スロープ型 (急・延) $D_3=4\text{m}, S_3=35\text{m}$	波高4mで周期6, 8, 10, 12s 波高7mで周期8, 10, 12, 14s

つために 1/50 としている。縮尺模型の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。すなわち浮体構造の固有周期について仮想実機と模型とで相似になっている。

以上の基準浮体模型の前面に付加構造物を剛的に取り付けた。付加構造物の形状を図-2 に示す。付加構造物の寸法については表-2 に示した。本実験で試みた付加構造物は、鉛直壁型一種類、L字型一種類、スロープ型の緩傾斜と急傾斜でそれぞれスロープの短いものと長いものの四種類の合計六種類であり、これらの実験に基準浮体に関する実験を加えた七種類の実験を行った。

容量式波高計によって、造波機前面の2点と、浮体先端と浮体終端の2点の合計4点において水路内の波高を測定した。レーザー変位計を用いて、浮体中心軸上に沿って等間隔に配置された10点について上下変位を測定し、また、同じように40点について、ひずみゲージによってひずみを測定する。

実験ケースについては表-2に示した。実験の1~4番までについては、同じ波条件下で実験を行ったが、実験の5~7番までについては、全ての波条件下で実験を行わず、一部についてのみ実験を行った。1~4番までが主要な付加構造物についての実験であり、5~7番までについては、スロープ型付加構造物の諸元の変更に伴う、おおまかな応答低減効果の変化の傾向を把握するための予備的な実験になっている。なお、今回の実験は現象を分析的に把握するための基礎的な検討が目標なので、全て規則波条件下で行った。

2.3 数値計算概要^{15,16)}

ここで用いる数値計算手法は著者らの一人が中心となって開発したものである。本来は半潜水式の大型浮体の波浪中弾性応答解析に開発されたもので、浮体間の流体力学的相互干渉と、いわゆる流力弾性を取り込んだ解析ツールである。任意形状、任意配置の没水体に支持された浮体構造を線形の範囲で厳密に、しかも現実的な解析時間で解析することができる。また、構造を立体骨組みでモデル化するので、構造設計の際に必要な部材力を直接取り出すことができる点のもう一方の特徴である。部材力は一方所について軸力、剪断力2方向、ねじりモーメント、曲げモーメント2方向の6要素を取り出すことができ、構造設計にそのまま用いることができる。この際、支持没水体に作用する荷重及びモーメントは厳密に評価され節点荷重として構造モデルに与えられている。

矩形状の大型浮体を多数の小さな矩形要素に分割して、これらの間の相互干渉問題として解けば、箱形の大型浮体についても応答解析が可能である。また、付加構造物についても任意形状没水体のひとつとしてモデル化することで、付加構造物を有する浮体についての解析も行うことができる。

今回の実験は二次元的な水路で行ったものであり、三次元的な構造を有する浮体を対象とする本数値解析理論は直接には適用できない。そこで、鏡像の考え方を取り入れることで、水路の壁面を考慮する。すなわち、水路の幅分だけは三次元的で、鏡像により同じ流体力学的状況が両側に無限に連なっているとして、数値解析を行う。

2.4 結果の比較

ここでは、まず表-2 の 1~4 番のそれぞれの付加構造物による応答低減効果について結果を概観し、次に各付加構造物間の比較を行う。実験値は実機換算で表示している。

(1) 基準浮体

図-3 に基準浮体の変位分布について示した。実験値は各点の変位の振幅を入射波の振幅で除した値で表示している。各図を比較したときに、長周期側で応答が大きくなる傾向のあることがわかる。図中の実験値で $H=4\text{m}$ 、 $H=7\text{m}$ とあるのはそれぞれ実機換算で 4m 、 7m の波高が入射した際の応答値を表す。従って、これら二つの実験値を比較すれば、応答の非線形効果の大きさの程度がわかる。

数値計算は実験値に現れている山谷を良く説明している。浮体前端の変位について数値計算結果は実験結果を若干上回る傾向が認められるものの、実験値と数値計算結果の相関は良いといえる。

次に図-4 に基準浮体のひずみ分布について示す。ひずみは仮想実機のデッキ鋼板での単位波振幅あたりの値に換算している。全般的に、数値計算結果は実験値を若干上回る傾向があるが、ひずみ分布についても、実験値と数値計算結果の相関は良い。

仮に波周期 10 秒で波振幅 4m 、つまり波高 8m の場合でも約 2000μ であり、応力度で 400N/mm^2 を越える。鋼材の許容応力度が 200N/mm^2 であるとするならば、この基準浮体の構造安全性から見た限界波高は 4m 程度であると推察される。

(2) 鉛直壁型

図-5 に鉛直壁型の変位振幅分布の結果を、図-6 にひずみ振幅分布の結果を示す。基準浮体の応答と比較すると、鉛直壁型では弾性応答低減効果が小さいことがわかる。これは実機換算の水深 30m に対して、実験に供した鉛直壁のサイズが水面下 4m と小さかったことが原因であると考えられる。さらにサイズの大きな鉛直壁型付加構造物については 5. で検討する。また、波高の異なる二つの実験結果を比較すると、鉛直壁型においても非線形影響が小さいことがわかる。

数値計算結果は実験結果よりもやや応答を大きく見積もる傾向があるが、数値計算結果と実験値の相関は良く、定性的・定量的に数値計算は実験をよく説明している。

(3) L字型

図-7 に L字型の変位振幅分布を、図-8 にひずみ振幅分布を示す。基準浮体の応答との比較から、L字型付加構造物の応答低減効果は基準浮体で応答が大きくなる長周期域においても大きく、このことがL字型の応答特性

となっている。周期 10 秒程度では基準浮体に比べて変位についてもひずみについても応答が $1/3$ 以下に低減することがわかる。その一方で、例えば周期 8 秒の応答についてはそれほど低減されていない。L字型付加構造物の応答低減効果は比較的長周期の特定の周期においては強く、またそれ以外の周期においては効果が小さくなるような周期特性を持っていることがわかる。また、波高の異なる実験の結果を比較すると、L字型についても非線形影響の小さいことがわかる。

実験値と数値計算結果の相関は変位についてもひずみについても良い。特に、周期 12 秒でのひずみ応答実験値に見られる、横軸 0.8 のL字型付加構造物付近でのひずみの一旦の低下を数値計算は再現しており、L字型付加構造物が付くことによる効果を含めた解析の精度が検証できたといえる。

(4) スロープ型

図-9 にスロープ型の変位分布を、図-10 にひずみ分布を示した。基準浮体の応答との比較から、スロープ型付加構造物の応答低減効果はL字型の場合と同様に長周期領域においても大きく、周期 10 秒付近では基準浮体に比べて変位についてもひずみについても応答が低減している。ただし、その低減の程度はL字型の場合ほどには大きくなく、応答低減効果の上で鉛直壁型とL字型の中間に位置するということがわかる。

また、波高の異なる実験結果を比較すると、両者の間で差異が小さい。スロープ型はスロープ上での砕波による非線形減衰効果も狙っていたが、この効果は小さいといえる。

数値計算結果と実験値を比較すると、変位については相関が良い。ひずみについては分布形状の一致度が低い周期が認められる。しかしながら、スロープ型付加構造物を数値計算に取り込むことによって、実験に見られる応答低減効果を概ね再現できているといえる。

(5) 各付加構造物間の比較

図-11 に浮体中央部における、変位応答の低減の様子を周期応答特性の形で示した。なお、実験値は周期 6 秒から 14 秒のものについては、波高 4m 相当のものを、周期 15 秒、16 秒のものについては波高 7m 相当のものを、単位波振幅あたりの値として表示している。

この図からL字型とスロープ型で応答低減効果が高いこと、L字型は 10 秒~11 秒付近で応答低減効果が最も大きいという周期特性を持つことが再度確認される。また、スロープ型では広い周期にわたって大きな応答低減効果が生じていることがわかる。鉛直壁型では応答低減効果は小さい。実験値では、基準浮体との差はほとんど

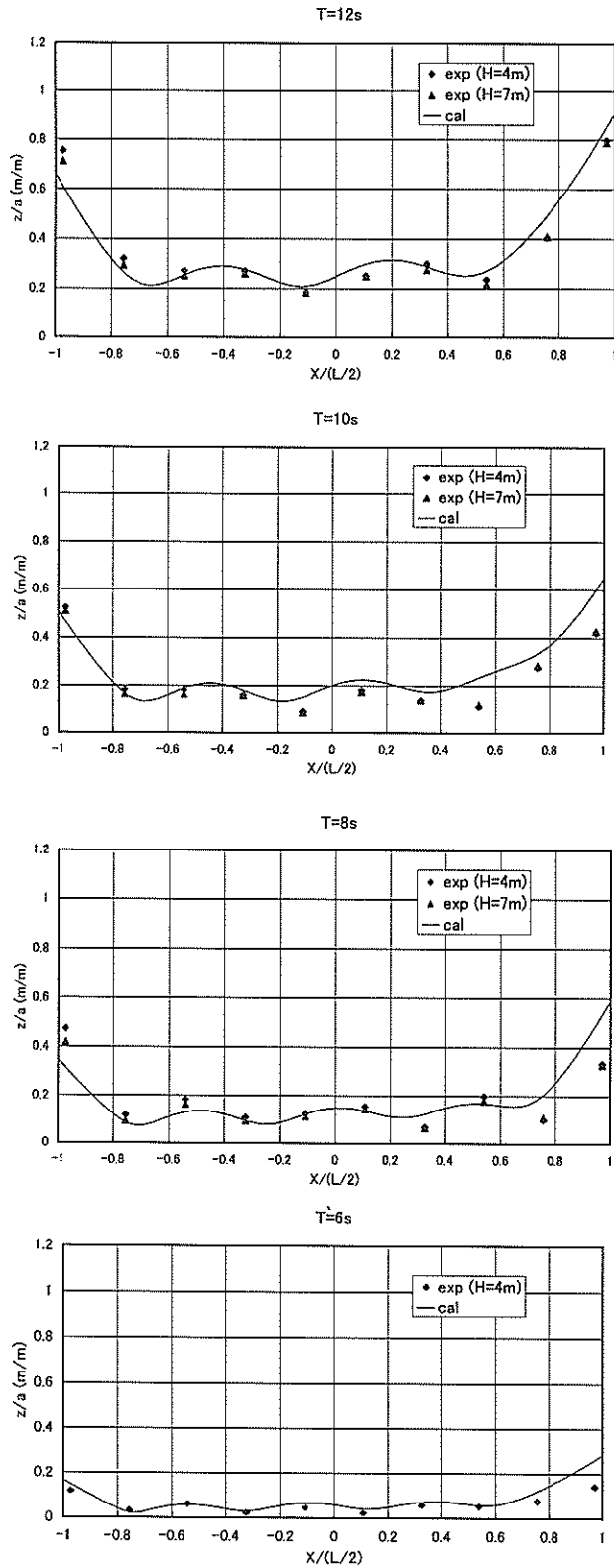


図-3 基準浮体の単位入射波振幅あたりの
変位振幅分布

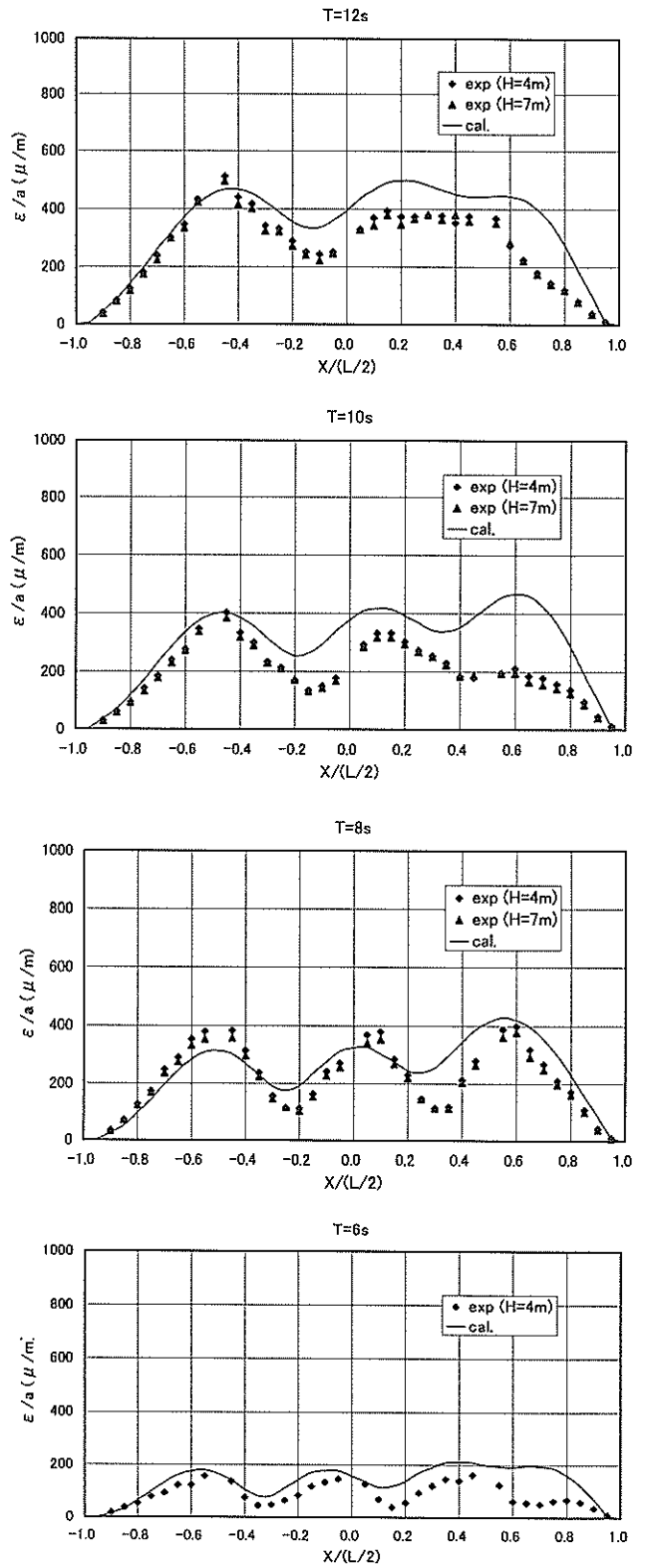


図-4 基準浮体の単位入射波振幅あたりの
ひずみ振幅分布

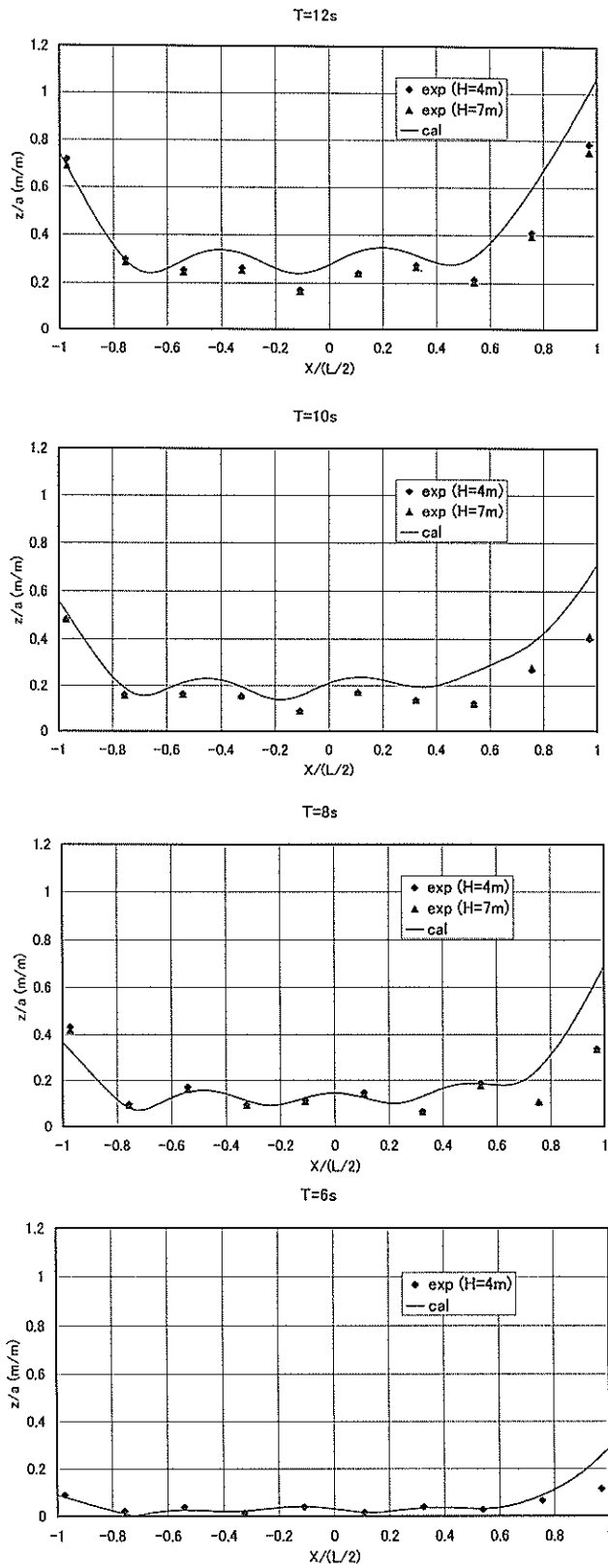


図-5 鉛直壁型の単位入射波振幅あたりの変位振幅分布

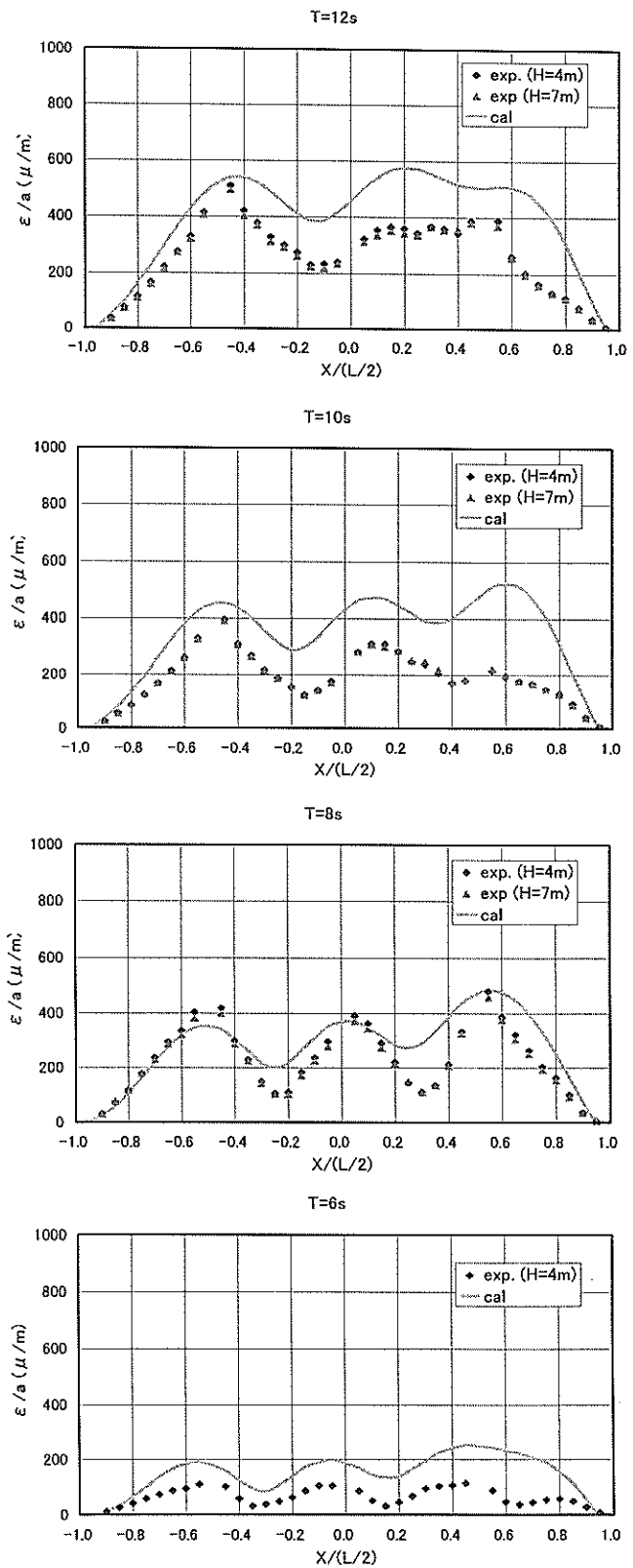


図-6 鉛直壁型の単位入射波振幅あたりのひずみ振幅分布

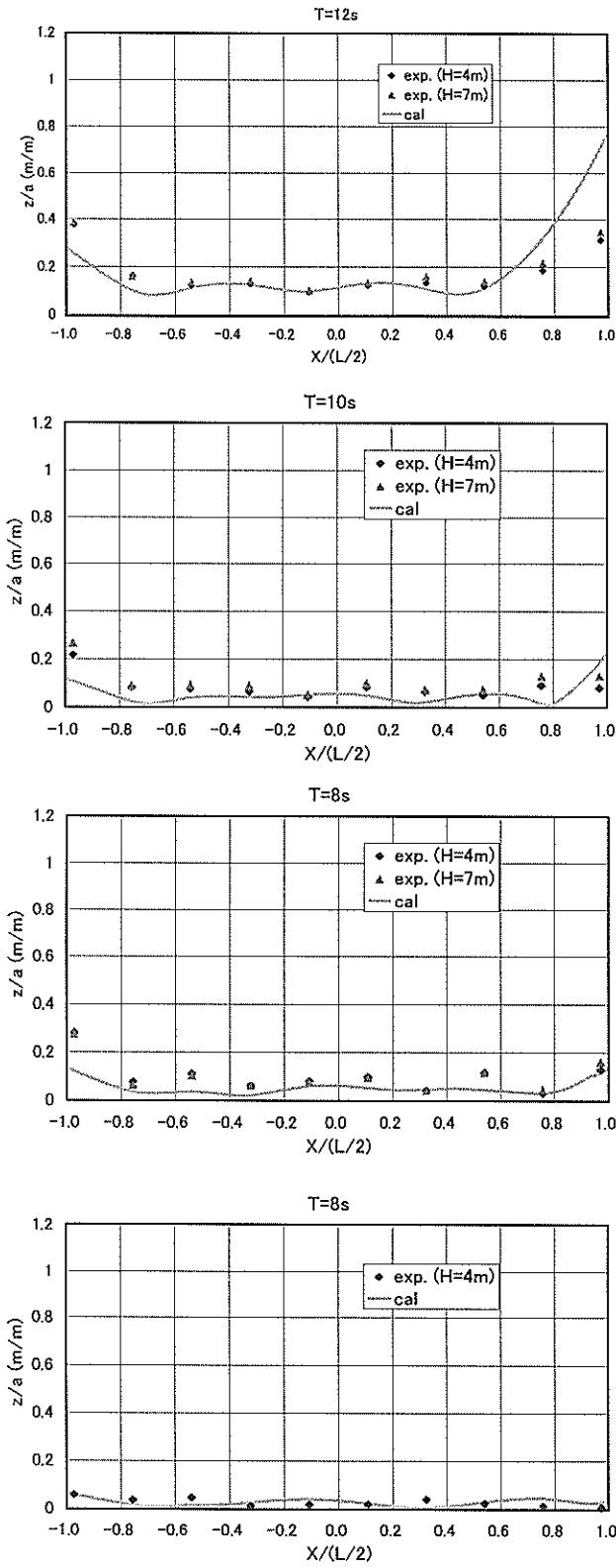


図-7 L字型の単位入射波振幅あたりの変位振幅分布

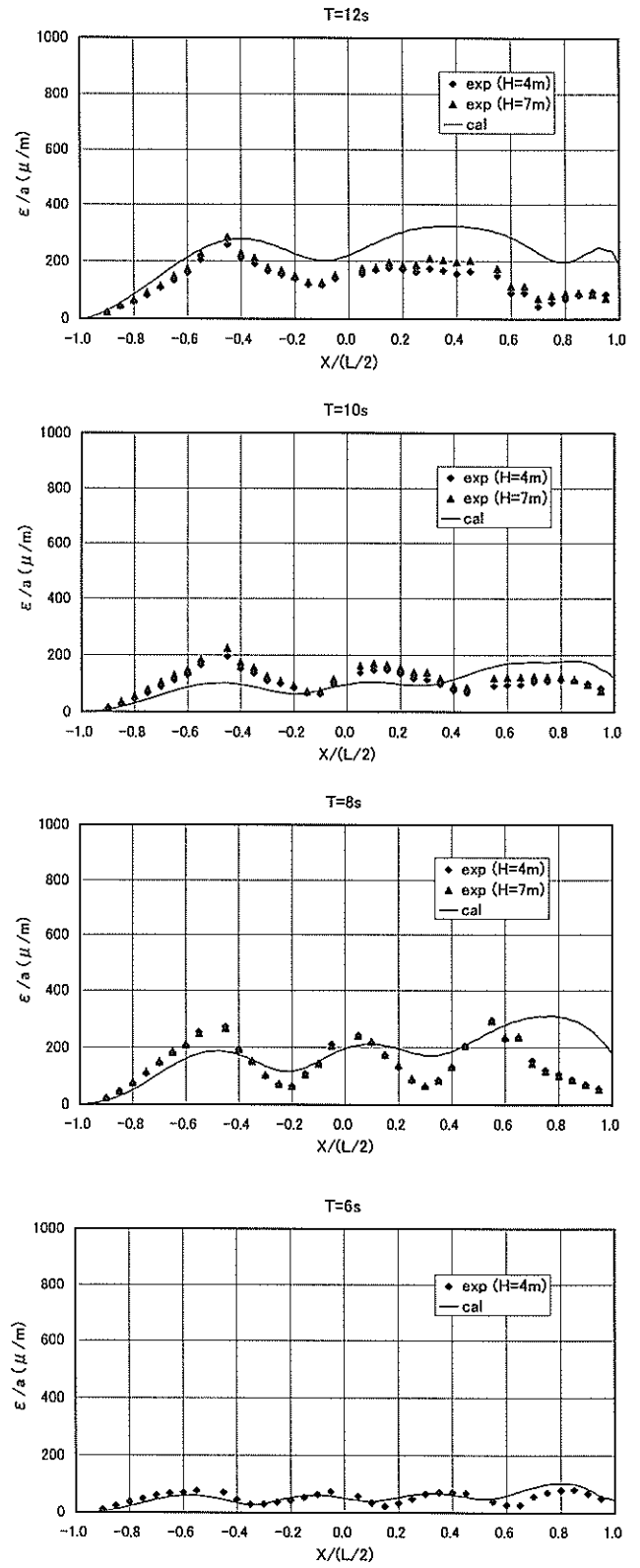


図-8 L字型の単位入射波振幅あたりのひずみ振幅分布

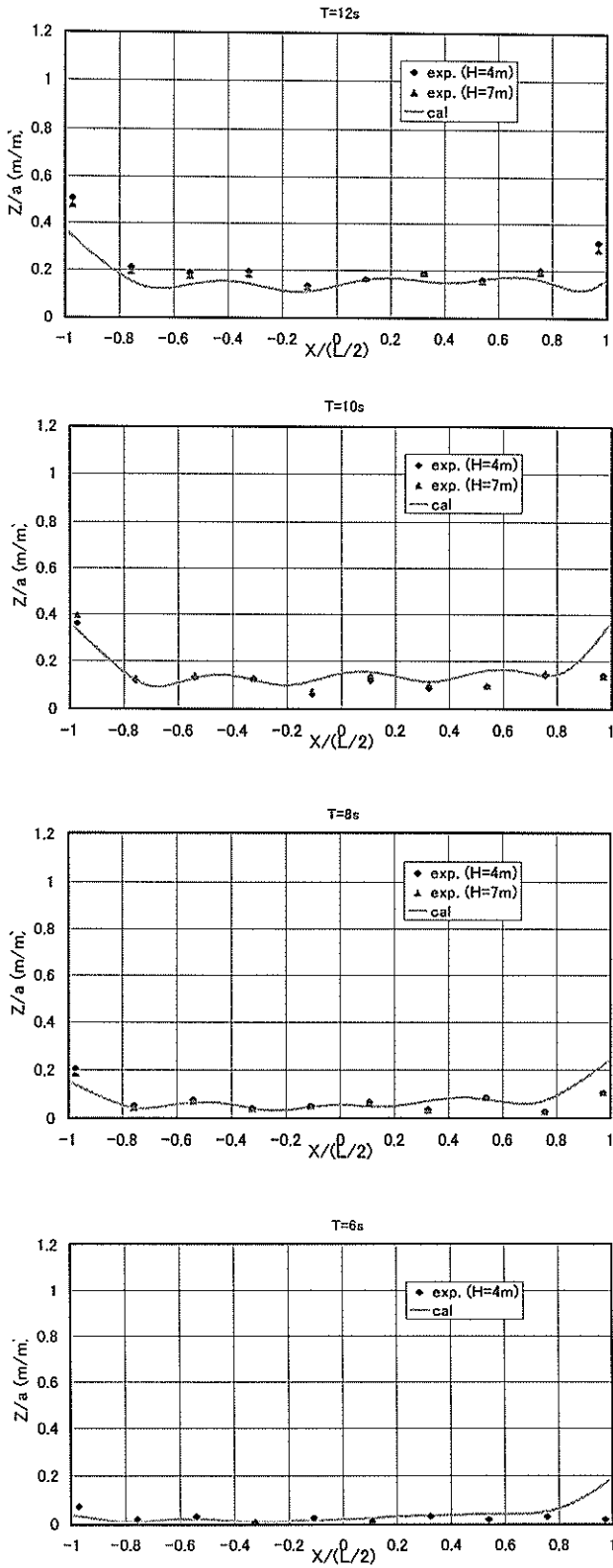


図-9 スロープ型の単位入射波振幅あたりの変位振幅分布

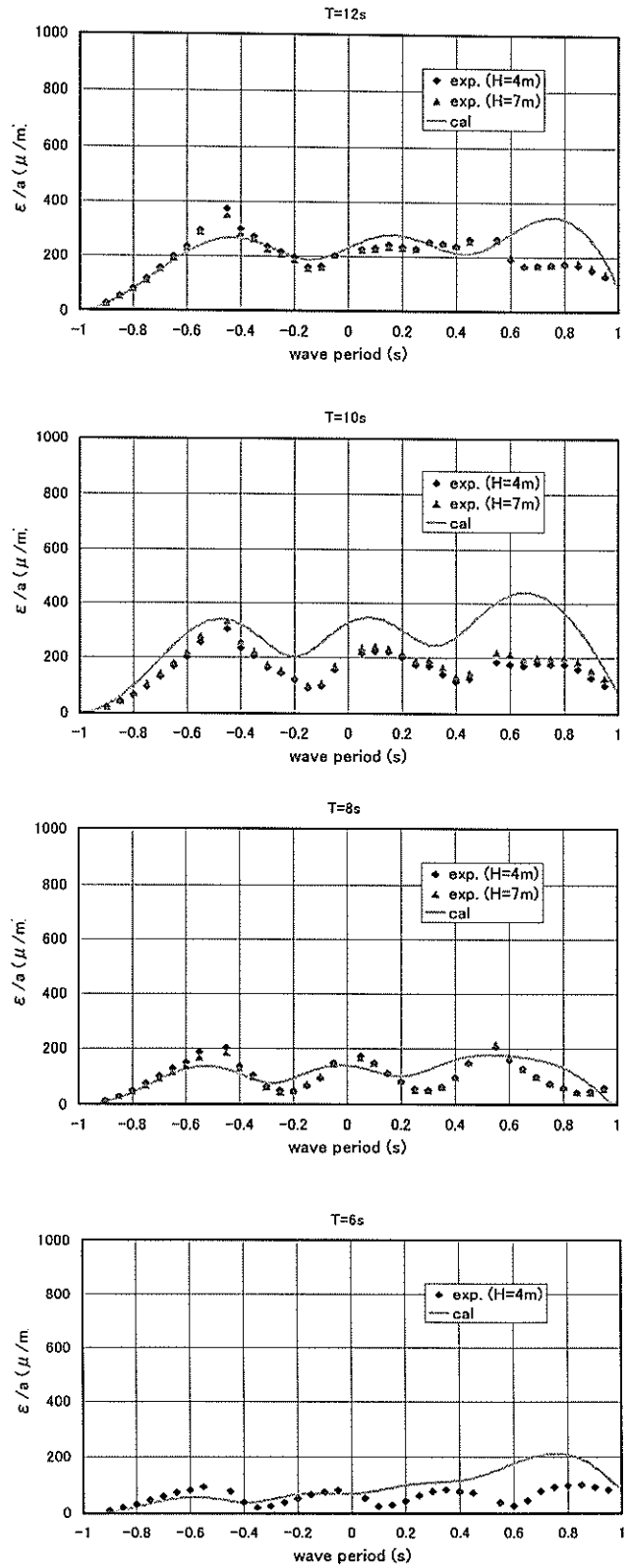


図-10 スロープ型の単位入射波振幅あたりのひずみ振幅分布

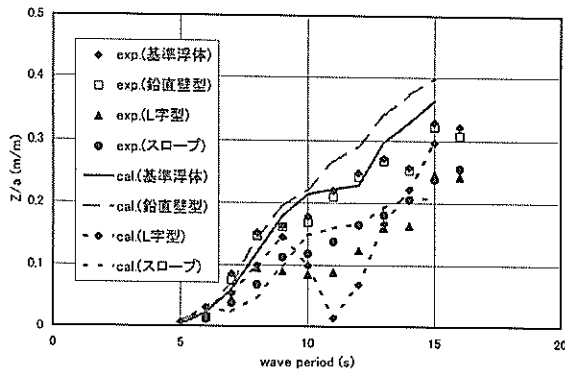


図-11 浮体中央部における上下変位応答特性
(各種の付加構造物の効果)

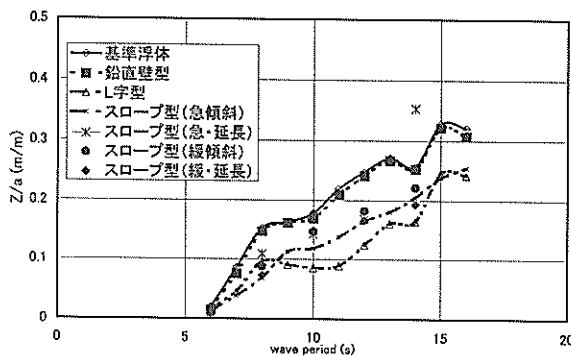


図-12 浮体中央部における上下変位応答特性
(実験値のみの比較)

なく、数値計算では長周期側でむしろ鉛直壁型付加構造物を有する浮体の応答の方がやや大きく計算されている。

図-12 には各種付加構造物を付した場合の浮体中央部での上下変位応答を実験値についてのみ示した。L字型で応答低減効果が最も大きいこと、次にスロープ型(急)の効果が大きく、鉛直壁型では応答低減効果がほとんどないことが確認される。また、スロープ型ではスロープを延長すること、あるいはスロープの取り付け角度を変えることによって、応答低減特性への影響が明確には生じないことがわかる。

3. 弾性応答低減のメカニズム

3.1 鉛直壁型付加構造物の弾性応答低減メカニズム

鉛直壁型付加構造物による弾性応答低減のメカニズムはカーテン式防波堤と同様のメカニズム、すなわち主としてディフラクション効果によるものであるとすると、短い波長の波ほど散乱されやすいから、鉛直壁型の弾性応答低減効果は短周期側でより大きくなる傾向にあると思われる。参考のために図-13 にカーテン式の防波堤の波高伝達率を示した。本図中では h は水深を、 λ は波長

を d はカーテン式防波堤の鉛直長さを表す。この図には、高周波数域、すなわち短周期側で波高低減率が高いこと、鉛直壁の水面下の長さが長いほど低減効果が高いこと、などが示されている。今回の実験で用いた鉛直壁は水面下に 8m と短く、応答低減効果が小さかったものと考えられる。鉛直壁が水面下にさらに延長された場合の弾性応答低減効果については 4. と 5. で示すこととする。

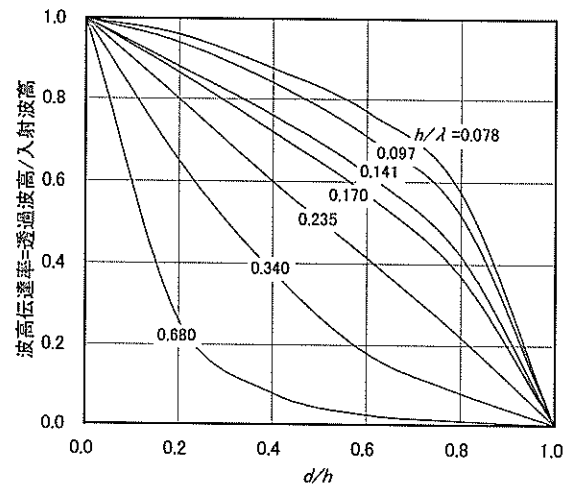


図-13 カーテン式防波堤の透過率^{17,18)}

3.2 L字型付加構造物の弾性応答低減メカニズム

L字型付加構造物の弾性応答低減メカニズムは複雑であるが、図-14 中に示す3つが主たる要因として考えられる。

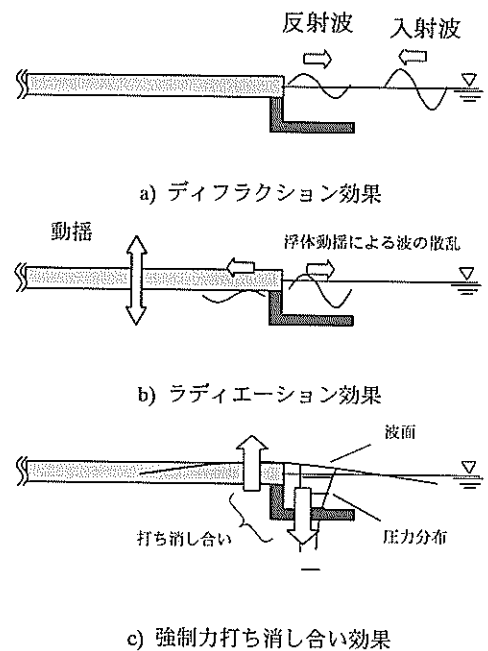


図-14 L字型付加構造による応答低減のメカニズム

a)は付加構造物前面での反射などのディフラクションによって、浮体構造内部に入射エネルギーを伝えない効果である。b)は浮体の動揺によって特に波上側に造波し、入射波が散乱されるラディエーションによって現れる応答低減効果である。付加構造物の両側の造波のうち、付加構造物の波下側への造波によって弾性応答が逆に増加し、弾性応答低減効果が小さくなる可能性もあるが、L字型の場合には浮体後方側に造波されにくいので、応答低減効果はより強くなる。c)は付加構造物の部分とそれにつながる浮体本体部分での波荷重の位相差によって、波荷重が互いに打ち消し合う効果である。すなわち、L字型構造の前方に突き出した部分で下方に波荷重が作用する時には、その直後の浮体構造部分では上方に波荷重が作用するというように、全体として常にL字型構造付近で波荷重が低減される。相対的に考えると波面が上下する時だけでなく、浮体が動揺する時にも同様の波荷重打ち消しの効果が現れる。この時、浮体前端での動揺量は小さくなり、浮体各部での応答も小さくなって、浮体全体に渡り弾性応答低減効果が得られる。

浮体が上下する際の波荷重打ち消し効果は浮体動揺という点でラディエーション効果に分類することもできよう。このようにそれぞれの効果の明確な分離は容易ではなく、実際にはこれらの複合的な効果で応答が低減される。しかし、どの要因が最も支配的かを知ることは、L字型付加構造物の設計の際に応答低減効果を予測するために重要である。

a)による低減効果を分離することは数値計算の上では次のように調べられる。つまり、L字型構造を固定構造として扱って、L字型構造による流体力学的な散乱のみを考慮し、構造的にはL字型構造と浮体本体の接続を考慮しない計算を case b として行い、構造的な接続をした (case a) の計算との比較を行う (図-15 参照)。

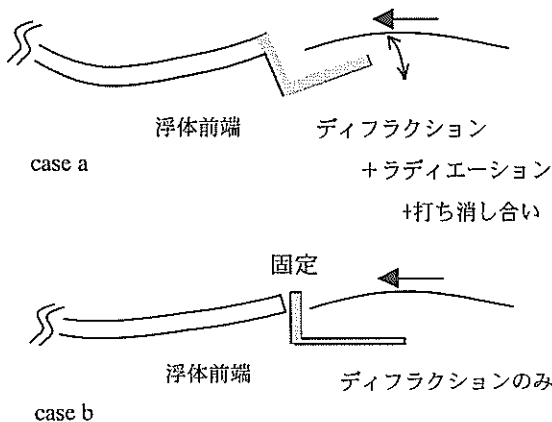


図-15 メカニズム説明のための追加計算説明図

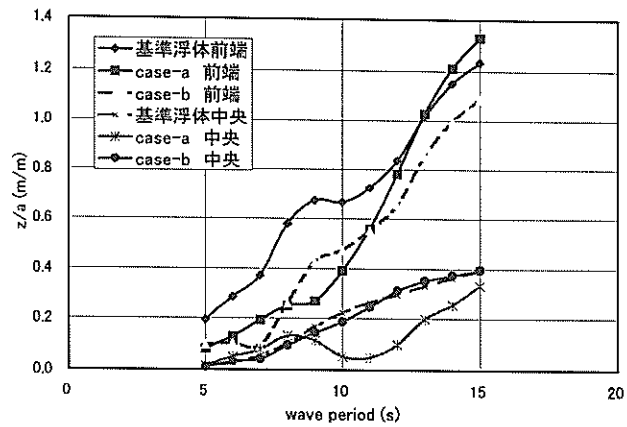


図-16 各ケースの浮体中央部上下変位応答

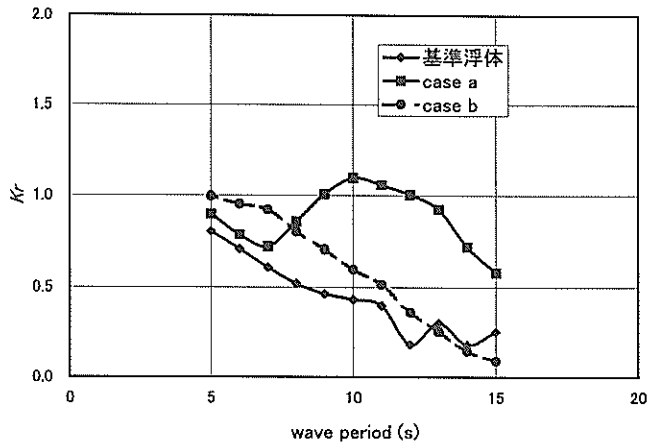


図-17 各ケースの反射率

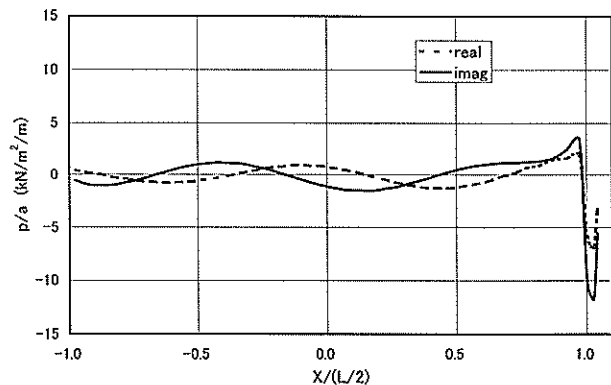


図-18 case a 周期 10 秒での波力分布

図-16 に数値実験結果を示した。L字型付加構造を固定した浮体(case b)では、浮体前端では応答低減効果が生じるものの、浮体中央部での応答低減効果は大きくないことがわかる。特に、浮体中央部の上下変位に注目すると明らかに応答特性が異なっている。

また、図-17 に case a, case b それぞれの場合での反射

率 K_r 及び基準浮体の反射率 K_r を比較して示した。case a の場合に応答低減効果が最も高い周期 10 秒付近で反射率が最も高くなっていることがわかり、一方で case b ではそのような特性ではなく、周期が短くなるほど単調に反射率が高くなるという結果を示している。ディフラクション問題としては等価な case a と case b でこのような傾向の違いが生じており、ディフラクション効果以外の効果が応答低減効果の特性を決定していることを示すものである。なお、反射率は本来 1.0 は越えない筈であるがここで用いている数値計算法は水路の幅分は三次元で計算し、鏡像を考える擬似的な二次元的計算手法であることが原因であると考えられる。

以上のことから、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応答低減とは若干異なることがわかる。

次に、case a で最も応答低減効果が現れる周期近傍である、周期 10 秒における動的圧力の瞬時値分布を図-18 に示した。real で示される曲線はある瞬間の圧力の分布を、imag で表される曲線はそれから位相が 90 度だけずれた時、つまり、4 分の 1 周期後の動的圧力の分布を示している。ある時刻とその 4 分の 1 周期後で L 字型付加構造物部分での波力と付加構造物に接続する浮体本体部分での波力は、逆向きになっているから、全ての時刻において、付加構造物近傍で常に波力の打ち消し効果が生じていることが確認される。

以上のことから、L 字型付加構造物の弾性応答低減のメカニズムは主として c) のメカニズムを用いて、次のように説明される。まず、波力の打ち消し合い効果によって、浮体前端部の動揺が抑えられる。大型浮体の弾性応答は波上側で与えられたエネルギーを弾性波で浮体内部に伝える現象であると解釈できるから、波上側での振幅が小さい場合には、波下側である浮体内部の応答も小さくなる。また、a) のディフラクションあるいは b) のラディエーションによる散乱によって、浮体下部の波エネルギーも小さくなっている。従って、浮体下部の流体から受ける圧力による応答も小さくなる。一方で、浮体内部、浮体下部ともに進行するエネルギーは小さくなっているから、入射波エネルギーとの差分は反射波として生じ、波漂流力などは大きくなる。

3.3 スロープ型付加構造物の弾性応答低減メカニズム

スロープ型による弾性応答低減のメカニズムは L 字型構造のメカニズムに類似していると考えられる。L 字型の応答低減メカニズムに加えて、非線形的な砕波による効果が期待されたが、実験ではその効果は明瞭には確認

されなかった。レイノルズ数を考慮した時に、実機レベルではさらに粘性などの効果が対的に小さくなるので、実機においてもスロープ型付加構造物の応答低減効果の大半は線形的効果の範囲で説明がつくものと考えられる。

4. 三次元モデルでの解析

本研究の実験で用いた構造は二次元的なものであったが、実際の浮体構造は平面的な広がりをもつ三次元的なものであり、付加構造物の面に直角に波が入射する横波時だけでなく、斜めに入射する場合にも応答低減効果が現れなければならない。ここでは、数値計算法を用いて、実海域での応答低減効果について検討する。

浮体長さ L を 1000m、浮体幅 B を 500m とする三次元的な仮想実機を考える。ここでは設置水深は 60m とした。浮体構造の剛性は水理模型実験の際に想定した仮想実機のものに従うものとする。浮体構造の概略図を図-19 に示している。ここで用いる付加構造物は水理模型実験で想定した仮想実機の L 字型付加構造物及び、鉛直壁型付加構造物で没水部の鉛直長さを 20m とするものである。付加構造物の軸線長さは L 字型と鉛直壁型で同じになっており、付加構造物をつけることによるコスト上昇が単純に鋼材重量で決まると考えた時に、同じコストをかけた場合の弾性応答低減の効果の比較になる。

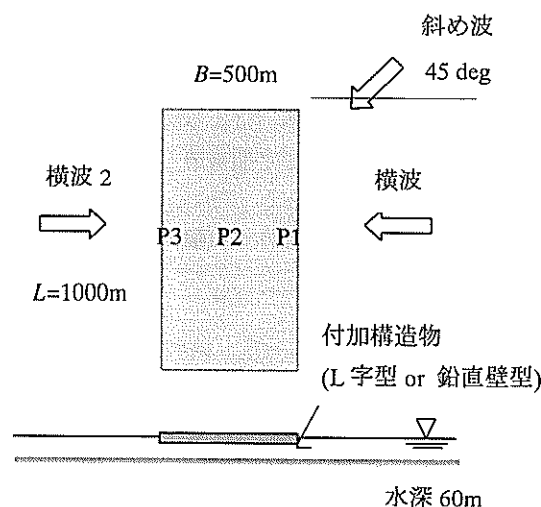


図-19 三次元モデル

4.1 横波中の弾性応答低減効果

まず、横波時の応答低減を調べ、水理模型実験で行った二次元的な検討と比較して応答低減の効果に関して基本的な特性が二次元的モデルと三次元的モデルで同等で

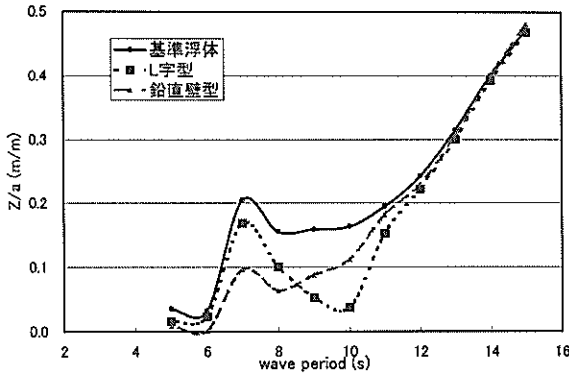


図-20 横波中での浮体中央部上下変位周期応答

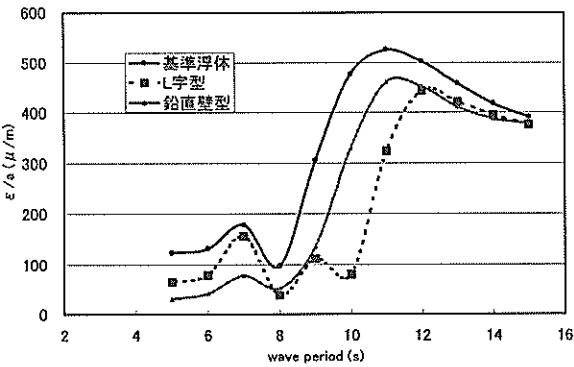
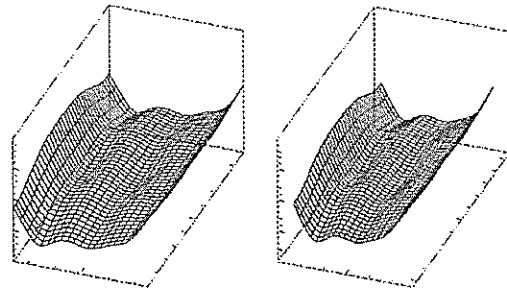


図-21 横波中での浮体中央部ひずみ周期応答

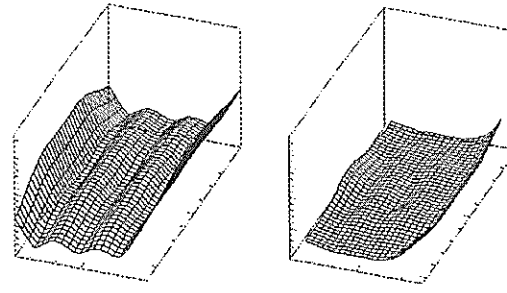
あるかを検討する。図-20 に点 P2 における上下変位振幅の周期応答特性を示した。この図と二次元的な検討結果を示す図-11 の比較からわかるように、「L字型は周期 10 秒付近で応答低減の効果が強く表れる」という特性がここで行った三次元的計算結果においても得られており、二次元計算でも三次元計算でも同じ基本特性が確認できる。また、ここでの計算のように鉛直壁型でも鉛直壁の長さが長い場合には、広い周期範囲に渡って比較的大きな応答低減効果が得られていることがわかる。ただし、応答低減効果が大きくなるのは短周期側においてであり、長周期側での応答低減効果は大きくない。L字型付加構造物が比較的長周期側でも応答低減効果があるのに対して、鉛直壁型付加構造物は短周期型であることが三次元モデルについても確認される。また、図-21 のひずみの周期応答特性についても同様のことがいえる。

図-22 に浮体弾性変形の様子を示す。それぞれ基準浮体と L字型の付加構造を有する浮体の上下変位振幅を鳥瞰する形で示している。ここで示したのは周期 14 秒、10 秒、7 秒のものであり、どちらについても浮体の前端と後端で上下変位は大きくなる。前端においては隅部で変位が大きくなるのに対して、後端では中央部が変位が大きい。このように波頂に平行な鉛直断面内を見た時に、浮体は必ずしも一様には変形せず、二次元的な検討だ



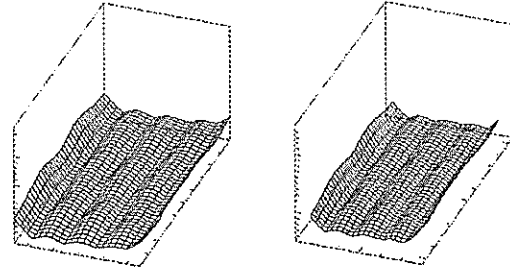
基準浮体, $\theta = 0\text{deg}$, $T=14\text{s}$

L字型, $\theta = 0\text{deg}$, $T=14\text{s}$



基準浮体, $\theta = 0\text{deg}$, $T=10\text{s}$

L字型, $\theta = 0\text{deg}$, $T=10\text{s}$



基準浮体, $\theta = 0\text{deg}$, $T=7\text{s}$

L字型, $\theta = 0\text{deg}$, $T=7\text{s}$

図-22 浮体上下変位振幅分布の鳥瞰図

けでは不十分であることがわかる。また、L字型付加構造物の効果が大きくなる周期 10 秒を除いては浮体の変形モードは、付加構造を有するかどうかによってほとんど変化しないこと、また、周期 10 秒においては全体的に変位が小さく、特に、浮体内部で変形が小さくなることがわかる。

4.2 斜め波中の弾性応答低減効果

次に、波との出会い角を 45 度とする時の、弾性応答低減効果について調べた。図-23 に浮体中央部の点 P2 での上下変位の周期応答を示した。鉛直壁型付加構造物では応答低減効果は小さいが、L字型では周期 11 秒以下で応答低減効果が認められる。ただし、横波の状態の時の結果に比較して、応答低減効果の程度は小さい。これは斜めから入射しているので、浮体の短辺側からの波入射があり、この点については基準浮体と同じ波の入射条件と

なるからであると考えられる。従って、例えばL字型付加構造物を浮体長辺側と短辺側に付加することで斜め波に対しても弾性応答を低減できると考えられる。

4.3 横波 2 中の弾性応答低減効果

次に、波が本来想定されている横波とは逆の方向から入射する時の応答低減効果について調べる。実機を設置する場所が沿岸域とすれば波方向はほぼ一方向と想定されるが、浮体の設置海域が沖合に近くなる場合には波向きが複数となることが想定される。

図-24に浮体中央部P2での上下変位応答の周期応答を示す。鉛直壁型とL字型は共に周期 11 秒近傍で一旦応答が小さくなるのがわかるが、それよりも短い周期ではむしろ応答増加につながっていることがわかる。これは付加構造物が付されたことで波下側の浮体端部で反射波が生じ、それによって励起される弾性波が浮体下部に伝播してくるためであると考えられる。

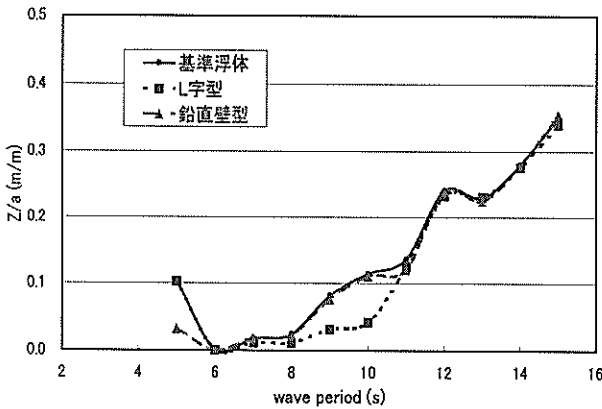


図-23 斜め波中での浮体中央部上下変位周期応答

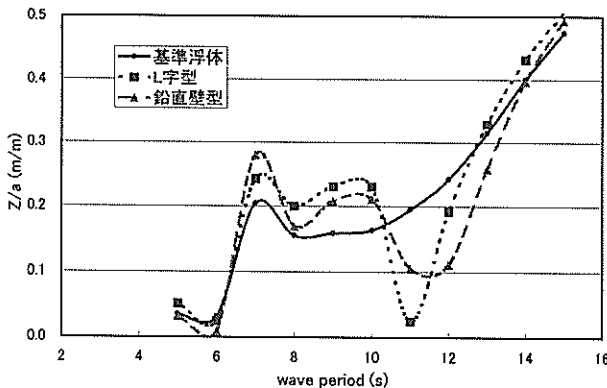


図-24 横波 2 中での浮体中央部上下変位周期応答

4.4 波浪変形および波漂流力

図-25～図-27にそれぞれ、基準浮体および、付加構造物をつけた浮体のうちL字型、鉛直壁型による波浪の変

形の様子を示した。入射した波高に対する各地点での波高の比で示されている。いずれも、周期 11 秒の横波におけるものである。図-26で示されるL字型浮体の場合には反射波が大きく、波高比が 2.0 を越える部分と 0.0 に近い部分が交互に存在していることから、浮体前面で重複波的な定在波が生じていることがわかる。浮体後方では透過波が小さくなって、静穏海域が作られていることがわかる。図-25で示される基準浮体の場合では散乱波が小さく、静穏領域もほとんど作られていない。図-27で示される鉛直壁型ではそれらの中間程度になっていることが確認される。ただし、これらの結果はL字型付加構造物によって応答低減効果が強く生じる周期 11 秒という特殊な周期におけるもので、L字型では常に散乱が大きくなるという一般的な結論を示すものではない。

図-28にはL字型の周期 11 秒の斜め波中でのある時刻における波浪分布の様子を示した。浮体前面に蛇の目状のパターンが広がっていることがわかる。このような波浪分布のパターンは付加構造物を有する浮体周りの波浪分布について示されたのは初めてであるが、同様のパターンが防波堤前面での波浪変形、あるいは付加構造物のない大型浮体前面での波浪変形として示されている¹³⁾。また、横波時と同様に、浮体後方には静穏海域が作られていることが確認できる。

これらの計算結果は大型浮体をコンテナバースとして用いる場合や、浮体建造時に作業船が大型浮体に近づく場合の船舶の動揺を考慮する際には、大型浮体による波浪変形を考慮する必要があることを示唆している。ただし、ここで示したものは長波頂規則波における結果であり、実際に稼働率などを推定する場合には短波頂不規則波（多方向不規則波）を想定する必要があるだろう。

また、反射波が大きいうという結果は漂流力が大きいということを示唆する。横波中の漂流力係数を図-29に示す。図中の縦軸は、浮体の長さ分だけの波が全反射した場合の波漂流力 $0.5 \rho g L a^2$ で無次元化した波漂流力係数を示しており、従って 1.0 の場合には全反射を表す。ここで、 ρg は水の比重量、 L は浮体長さ、 a は波振幅を表している。鉛直壁型の付加構造物を有する場合には、ほぼ全周期に渡って、基準浮体の場合に比較して一様に波漂流力係数が大きくなっている。L字型の場合には、上下変位応答が最も低減される周期 10 秒付近で波漂流力は最大になる。すなわち、浮体の応答低減は係留力増加につながり、設計の観点からはトレードオフの関係にある。

前節の横波 2 中の応答低減の場合に相当する、波が付加構造物がついている側と逆の方向から入射する場合の漂流力はほぼ全ての周期領域に渡って、付加構造物を有

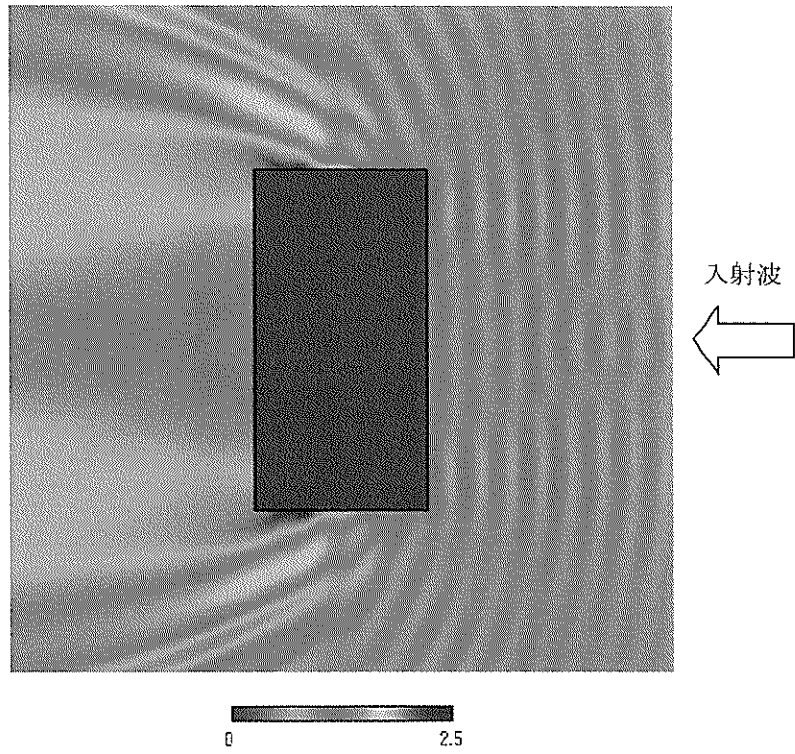


図-25 周期 11 秒の横波中の基準浮体まわり波高比分布

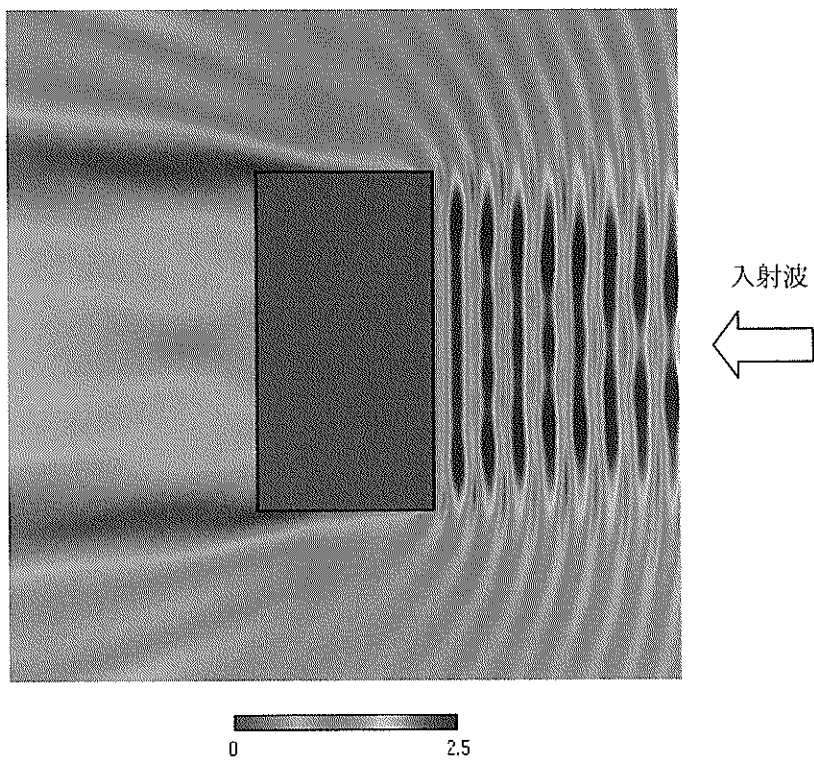


図-26 周期 11 秒の横波中での L 字型の場合の浮体周りでの波高比分布

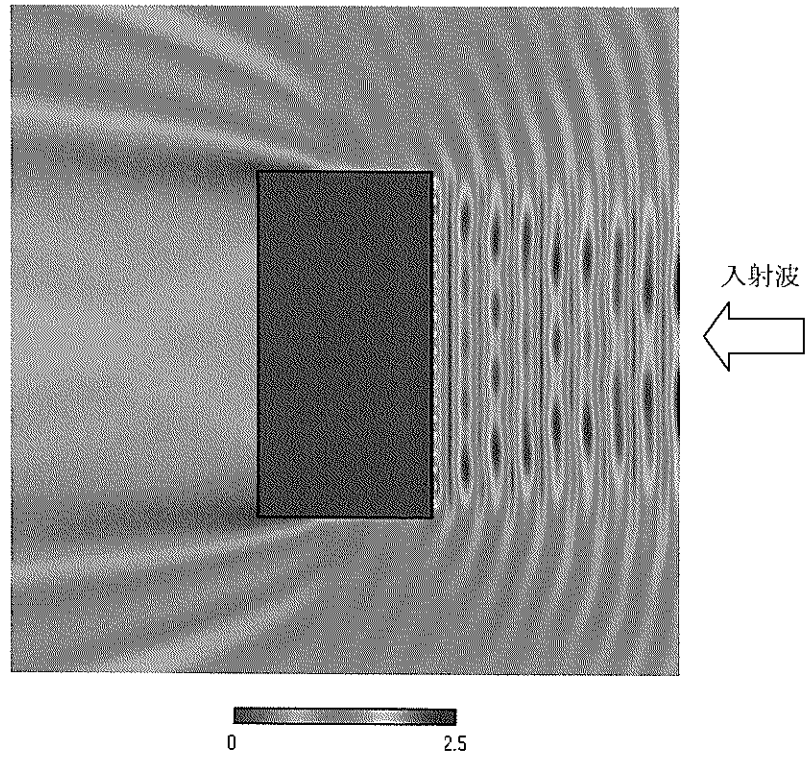


図-27 周期 11 秒の横波中での鉛直壁型の場合の浮体周り波高比分布

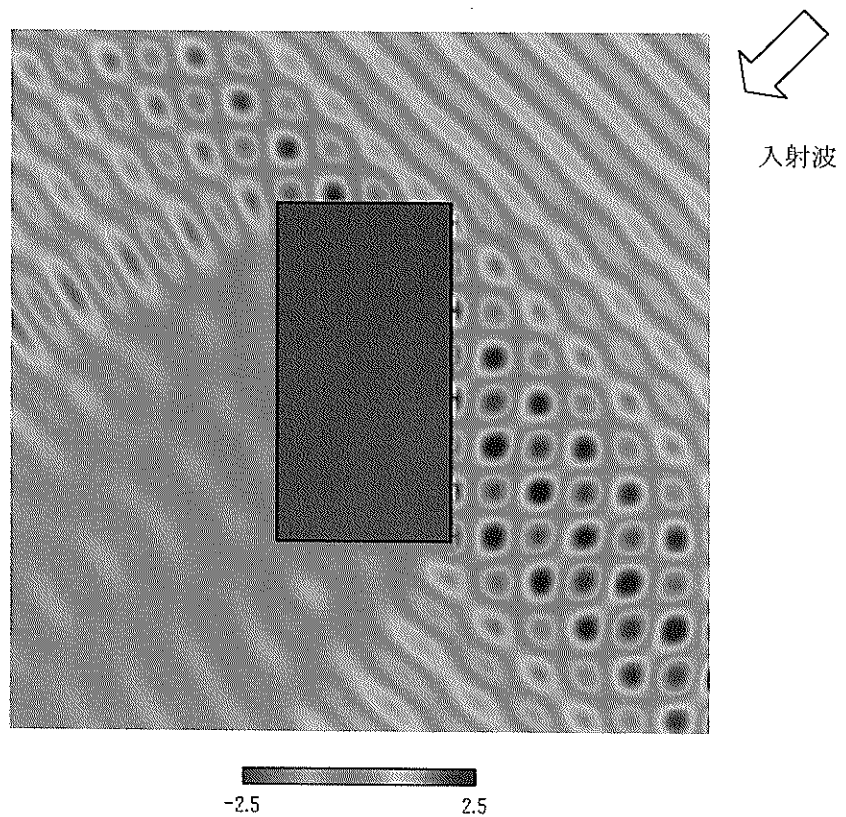


図-28 周期 11 秒の斜め波中での L 字型の場合の浮体周りでの波浪瞬時値分布

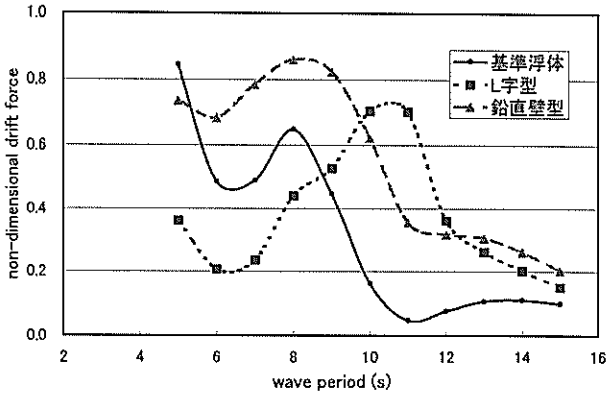


図-29 横波中での波漂流力特性

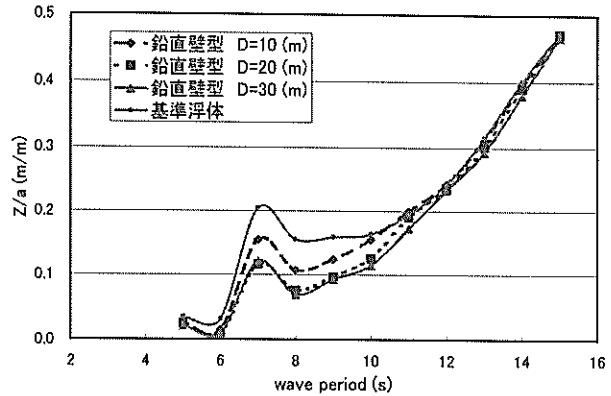


図-31 各種鉛直壁型が付加した浮体中央部
上下変位応答

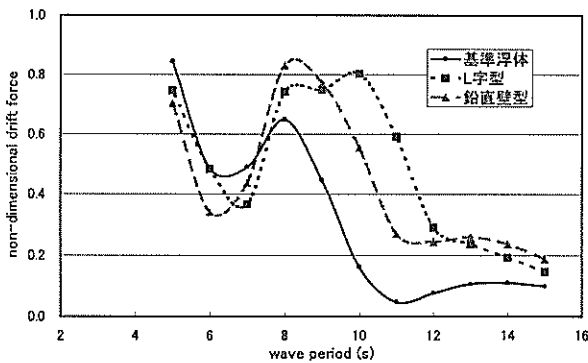


図-30 横波(2)中での波漂流力特性

する方が大きくなる(図-30参照)。このことはL字型でも鉛直壁型でも基本的に同じである。従って、付加構造物は常に波上側につける必要があり、仮に想定した波向きと逆方向からの入射がある時にはむしろ弾性応答の増加かつ係留力の増加につながる。従って、付加構造物の採択にあたっては、浮体本体の弾性応答と係留力に及ぼす影響のバランスを考慮する必要がある。

5. 設計の観点からの考察

ここではパラメトリックスタディを行って、付加構造物の形状や寸法に関するどのパラメータが応答低減特性に及ぼす影響について論じる。このような議論は弾性応答低減のための付加構造物の設計において重要である。大型浮体の建設が決まり、海象条件などの自然条件が設定された時に、どのタイプの付加構造物を用いるのかの判断、また、タイプが決まった際にどのような諸元が最適であるかを決定するための指針となるからである。特に断りのない限り、前章で用いた三次元モデルと同じものを用いることとし、付加構造物の諸元についてのみ変更する。

なお、以下では代表的な応答として浮体中央部の変位のみを参照することにする。これは、本研究の中心的な課題が断面力などの構造応答の低減であり、これまでの結果から構造応答は浮体中央部の構造応答で代表でき、さらに浮体中央部での構造応答の低減は浮体中央部での上下変位応答で代表させて比較できると考えるからである(例えば図-8、図-20、図-21参照)

5.1 鉛直壁型付加構造物

図-2の鉛直壁型構造の形状パラメータ D_1 を変化させて応答の変化について調べる。 D_1 は 10m, 20m, 30m の 3 ケースである。

図-31に浮体中央部での上下変位応答特性曲線を示した。3.1の考察で予想したように、鉛直壁の鉛直方向の長さが長いほど、弾性応答低減効果が大きいことがわかり、これは鉛直壁型の防波堤から予想される定性的な特性であるといえる。

一方で定量的に比べた時に、防波堤としての鉛直壁の効果に比べて、鉛直壁型付加構造物による大型浮体の弾性応答低減効果は若干小さい。図-13に示した波高伝達率のチャートを用いると、例えば、 $D=20\text{m}$ の場合に、水深 h に対するカーテンの深さ D の比 D/h は 0.33 であり、周期 8 秒に対応する波長は 100m なので、波長 λ に対する水深 h の比 h/λ は 0.6 と計算されることから、伝達率は 0.2 程度と推定される。鉛直壁を用いた時の応答量も基準浮体の応答量に比較して 0.2 倍となりそうであるが、周期 8 秒で応答は基準浮体に対してほぼ半減という程度である。

これは付加構造物をつける場合には浮体との流体力学的干渉や付加構造物の部分からの荷重伝達などの複雑な干渉があるので、弾性応答低減のメカニズムを鉛直壁の防波堤的な効果として説明できても、それだけで応答低

減効果を定量的に見積もることができないことを示すものである。

鉛直壁型の付加構造物を対象にした太田らの実験¹⁴⁾は、短周期側である h/L が大きい条件下で行われているので、今回の数値計算結果と単純に比較することはできないが、やはり鉛直壁型の防波堤の効果から単純に見積もった場合に比べて、弾性応答低減効果は小さい。

5.2 L字型付加構造物

図-2 のL字型構造の形状パラメータ D_2 及び S_2 を変化させて応答の変化について調べる。

(1) L字型付加構造物の深さ D_2 の影響

図-32 にL字型付加構造物の没水水平部長さ S_2 を一定として深さ D_2 の変化させた場合の、応答低減特性の代表的な応答として浮体中央部での上下変位応答について示した(図中で D_2 は D で表される)。このパラメトリックスタディの結果、深さ D_2 の影響については次のような二つの傾向が見いだされる。第一に、深さ D_2 が小さくなるほど、応答低減効果が強く現れる周期が長くなる。例えば、深さ D_2 が6mの時に、応答低減効果が最も大きく表れるのは、10秒前後であるのに対して、深さ D_2 が16mになる場合には、8秒程度で応答低減効果が最も大きくなる。第二の傾向は深さ D_2 が大きくなるほど、応答低減の程度が大きくなることである。

初めに挙げた点は、波の浅水影響として説明できる。L字型付加構造物の弾性応答低減効果のメカニズムは主として付加構造物付近のある長さ内での波強制力の打ち消しで説明していた。この時、入射波の元々の周期に対応する波長と没水水平部長さ S_2 の関係よりも付加構造物付近部分での波長を代表する水深 D_2 における波長と没水水平部長さ S_2 の関係で応答低減特性が決定されると考えられる。深さ D_2 が小さくなることは水深が浅くな

ることと同じ効果があり、L字型没水水平部における波の波長は本来の入射波波長に比べて短くなる。従って、逆に、L字型付加構造物の弾性応答低減効果が強く生じる波長が一定であるとするれば、この時の波周期は深さ D_2 が小さくなるほど大きくなる。二番目に指摘した点は、鉛直壁型付加構造物で深さ D_1 が大きくなるほど、応答低減効果が大きくなることと類似の現象である。L字型付加構造物でも深さ D_2 が大きくなるほど、入射エネルギーをより反射するので応答低減効果は大きくなる。

(2) L字型付加構造物の長さ S_2 の影響

図-33 にL字型付加構造物の深さ D_2 を一定として長さ S_2 を変化させた場合の、弾性応答低減の特性の代表的な応答として浮体中央部での上下変位応答について示した(図中で S_2 は S で表される)。このパラメトリックスタディの結果、長さ S_2 が大きくなるほど長周期側で弾性応答低減効果が大きくなることがわかる。長さ S_2 が8mである場合には周期8秒付近で応答低減効果が大きく、長さ S_2 が16mの場合には、12秒付近で応答低減効果が強く表れている。

このことも、L字型付加構造物の弾性応答低減メカニズムが主として付加構造物付近での波強制力の打ち消し合い効果で説明されることを用いて次のように解釈できる。すなわち、L字型付加構造物の長さ S_2 が大きいということは、より長い波長で波強制力が打ち消し合う効果が生じることを意味し、結果的に長周期側で応答低減効果が大きくなると説明される。

(3) 浮体剛性 EI の影響

L字型の付加構造物の弾性応答低減の効果は形状以外の要素に依存する可能性がある。ひとつの例として、浮体の剛性を変化させて弾性応答低減の特性について調べた。図-34 にL字型で浮体の剛性を変化させた時の浮体中央部での上下変位応答の変化について示した。

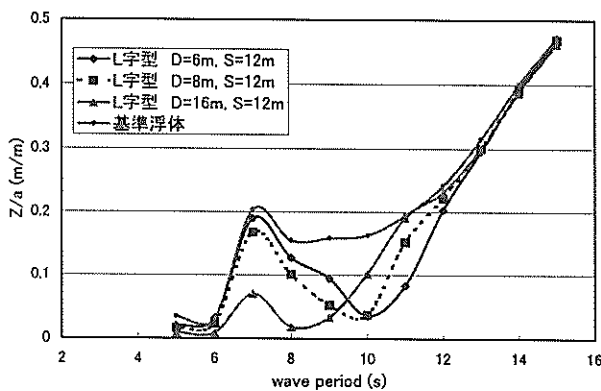


図-32 L字型のパラメータ D を変化させた場合の浮体中央部上下変位応答曲線

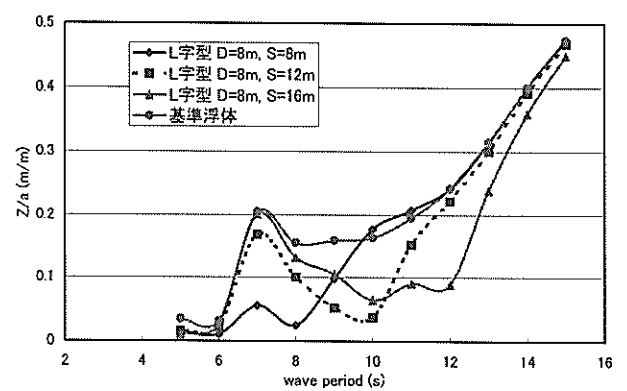


図-33 L字型のパラメータ S を変化させた場合の浮体中央部上下変位応答曲線

L字型付加構造物による応答低減の効果は、ある周期で最も強く生じることが特徴であり、剛性が小さい場合にこのような周期がやや長周期側にずれることがわかる。ここで、応答低減効果を見積もる時に難しいのは、L字型付加構造物を有することによって応答低下があるのか、あるいは剛性が変化することでL字型構造に無関係に応答低減が生じているのかが厳密に区別されないことである。剛性が大きい方が、弾性応答は小さく、ある点の上下方向変位も小さくなるべきであり、実際にこのことは図-34 からわかる。

剛性の変化に伴う上下変位応答特性の変化の程度は微小であり、応答の低減が顕著に現れる周期はいずれも周期10秒近辺を大きく離れていない。従って、L字型の弾性応答低減効果の特性は浮体の剛性にはあまり関係がないといえる。剛性変化はL字型の弾性応答低減効果の特性とは相関が小さく、およそ浮体形状だけで決定される波強制力の分布に起因する打ち消し合いが弾性応答低減効果の支配的な要因であることを示している。

(4) L字型付加構造物の応答低減効果のまとめ

図-33で、長さ S_2 が12mの場合に最も応答低減効果が大きくなる周期10秒付近での深さ D_2 に等しい水深8mにおける波長は80m程度で、没水水平部の長さの6~7倍程度になっている。同様に、長さ S_2 が8m、16mの場合に最も応答低減効果が大きく生じる8秒では波長50m及び100m程度なので、波長は没水水平部長さの長さ6~7倍程度となっていることがわかる。また、深さ D_2 を変化させた図-32においても同様のことが確認される。

以上から、L字型付加構造物の弾性応答低減の効果について、深さ D_2 に等しい水深における波長がL字型付加構造物の没水水平部長さ S_2 の6~7倍程度になる時に応答低減の効果が大きく、また、この関係は浮体剛性には大きく影響されず、さらに、深さ D_2 が大きいほど応答低減効果の程度が大きいといえる。

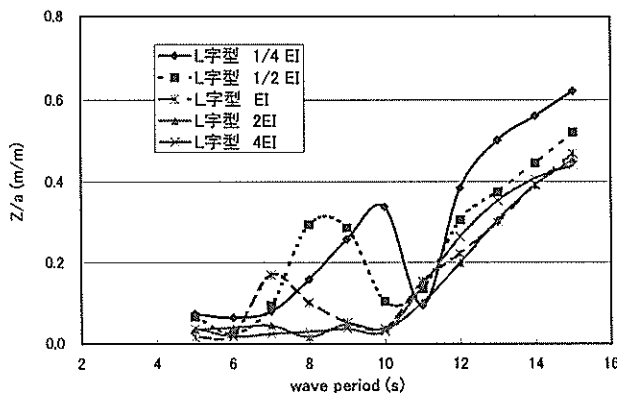


図-34 各種浮体剛性における浮体中央部上下変位応答

5.3 複合型付加構造物

L字型の付加構造物をつけた場合には長周期側で弾性応答低減効果があることがわかった。一方で、短周期側での応答低減については効果的ではなかった。また、鉛直壁型では長周期側での効果は小さいものの、短周期側で応答低減効果が大きいことがわかった。従って、これら二つを複合させて用いることで、より広い周期に渡って応答を低減することのできる可能性がある。浮体中の曲げモーメントなどの断面力に代表される構造応答は長周期側で大きくなるので、長周期側の応答は構造安全性について支配的であり、一方で短周期側での応答は加速度などの関係から乗り心地などの機能性について支配的である。このことから、広い周期域に渡って応答を低減することは浮体構造の用途を広げる上で重要である。

(1) 鉛直型とL字型の混合

図-35に示すように、L字型付加構造物と鉛直型付加構造物を交互に配置する場合の応答について検討した。L字型付加構造物と鉛直型付加構造物の1ブロックの幅は50mとして、交互に配置している。図-36に数値計算結果を示した。

この図から、初めの意図通りに、広い周期に渡って応答低減が実現されていることがわかる。8秒から11秒付近で応答低減効果の大きくなるL字型の応答特性と8秒以下でも応答低減効果のある鉛直壁型の応答特性が表れている。この周期範囲では応答は半減している。このように付加構造物を複合化することで、両者の長所を用いることができることが示された。

一方で、付加構造物による弾性応答低減の短所である波漂流力の増加については、図-37に示されている。漂流力についても、L字型・鉛直壁型の両者の漂流力特性を併せ持っていることが示されており、実際に複合型の付加構造による弾性応答低減効果を用いる場合には係留系設計の際に注意が必要である。

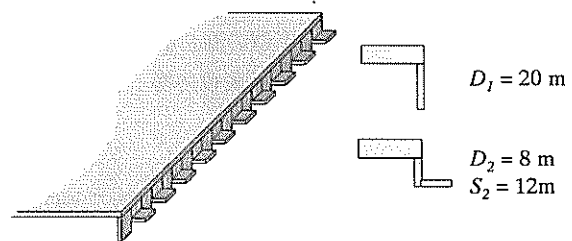


図-35 複合型付加構造物

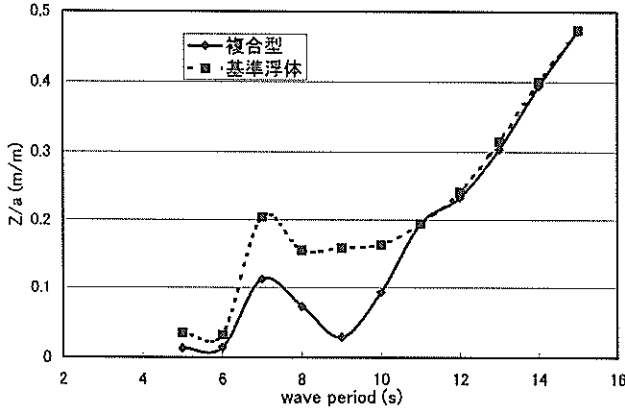


図-36 鉛直壁型とL字型複合付加構造物が付された浮体中央部上下変位応答

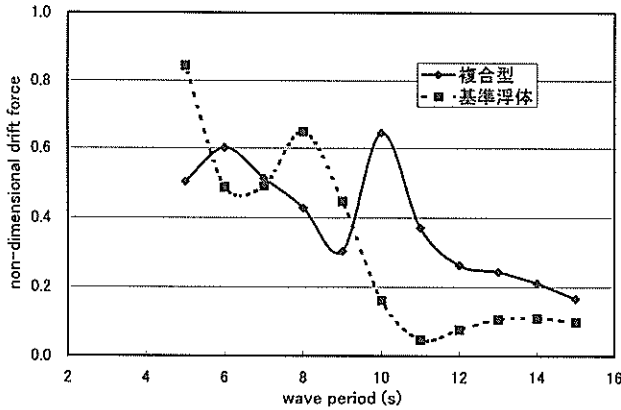


図-37 鉛直壁型とL字型複合付加構造物が付された浮体に作用する波漂流力特性

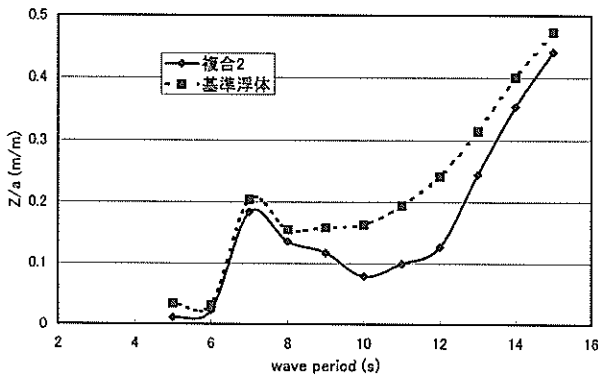


図-38 二種類のL字型の混合構造が付加した浮体中央部上下変位応答

(2) 二種類のL字型の混合

次に、二種類のL字型構造を付加することによって、広い周期域に渡る応答低減を試みた。図-33を参照すると、 $S_2=16m$ の場合に長周期側12秒付近での応答が低減され、 $S_2=8m$ とする時に8秒付近で応答が低減されている。これらの特性を組み合わせることができれば、広い

周期に渡り弾性応答の低減効果が得られると予想される。この時のモデルを複合2と呼ぶこととし、(1)で扱った複合モデルと同じ配置で、1ブロックを50m単位として付加構造物の形状だけを入れ替えた。

図-38に計算結果を示す。9秒から12秒付近の広い周期範囲で応答が低減しているものの、この特性は $S_2=16m$ とするL字型構造を1種類だけ付加した場合の応答に近くっており、必ずしも混合したことの長所が表れていないと判断される。しかも、 $S_2=16m$ とするL字型構造を1種類だけ付加した場合に比較して応答低減の程度は若干小さくなっているに過ぎない。

これは次のように考えられる。二種類の付加構造物を用いているとはいえ、両者の弾性応答低減のメカニズムは、波強制力の打ち消し合いという点で同じである。応答低減効果が現れるのはそれぞれの付加構造物に加わる荷重とそれに接続される浮体本体部分に作用する荷重が位相的に打ち消し合った時であり、どちらかの付加構造物一方だけで波荷重を打ち消し合っているも全体の弾性応答低減には結びつかない。今回のケースの場合は、L字型の $S_2=16m$ とする部分に作用する波荷重が支配的で、L字型の $S_2=8m$ とする部分に作用する波強制力は相対的に小さいので、弾性応答低減効果は $S_2=16m$ のL字型構造を1種類だけ付加する場合とほぼ同じ弾性応答低減特性として表れる。

弾性応答を広い周期帯に渡って効率的に低減するために複合的な付加構造物を用いる場合には、弾性応答低減メカニズムの異なる二種類あるいはそれ以上の種類数を用いることが有効であることがわかる。

6. 結言

大型浮体の弾性応答を低減させる目的で、浮体端部に小規模な構造物を付加することの効果調べた。まず、二次元造波水路で弾性応答低減効果について実験的な検討を行った。ここで検討した付加構造物は大きく分けて、鉛直壁型、L字型、スロープ型の三種類である。この実験的から、L字型及びスロープ型では比較的長周期側でも大きな応答低減効果が現れることがわかった。次に、数値解析手法を用いて、実験結果の説明を試みた。数値解析結果は実験結果と相関が良く、特に鉛直壁型付加構造物、L字型付加構造物それぞれを付した場合の弾性応答低減の効果は数値計算を用いて精度良く予測できることがわかった。一方で、スロープ型付加構造物に関する数値計算は実験結果を十分な精度で説明するに至らず、今後の数値解析の工夫などが将来の課題として残った。

また、数値解析手法を用いることで、付加構造物による大型浮体の弾性応答低減メカニズムが明らかにされた。そこで、数値計算手法によってパラメトリックスタディを行い、付加構造物の形状と応答低減特性の関係について考察した。

本研究で得られた結論はつぎのようにまとめられる。

- 1) 鉛直壁型付加構造物による弾性応答低減は短周期側で効果が現れ、短周期側で波長が短くなるほど応答低減効果が大きくなるという特性を持つ。L字型付加構造物では長周期側のある特定の周期を中心として弾性応答低減の効果が強く現れる。
- 2) L字型については斜め波中でも弾性応答低減の効果が確認されたが、鉛直壁型についてはその効果は十分確認できなかった。また、付加構造物が取り付けられている側とは逆の方向から、波が入射する場合にはむしろ応答を増加させてしまう。
- 3) 付加構造物を取り付けると、漂流力は全般的に増加する。すなわち、上下方向の弾性応答が低減される一方で浮体前方での反射波は大きくなる結果として波漂流力が大きくなる。また、付加構造物が取り付けられている側とは逆の方向から入射波があり、上下方向変位が低減されない場合でも、波漂流力は増加する。
- 4) L字型付加構造物による弾性応答低減は主として付加構造物付近での波荷重の打ち消し合いによって生じている。副次的な効果として、付加構造物による波エネルギー散乱効果が存在する。
- 5) L字型構造の鉛直部長さ D_2 に等しい水深における入射波の波長が L字型付加構造物の突出部分の没水水平部の長さ S_2 の 6~7 倍程度になる時に弾性応答低減効果が最も大きく現れる。従って、没水水平部が長いほど、長周期側で応答低減効果が生じ、鉛直部が大きいほど短周期側で応答低減効果が大きくなる。
- 6) 鉛直壁付加構造物はカーテン式防波堤と同様な波エネルギー散乱によって弾性応答低減の効果を生じ、没水部の鉛直長 D_1 が長いほど弾性応答低減効果が大きくなる。ただし、応答低減の程度はカーテン式防波堤の波高伝達率から推定されるよりも小さい。
- 7) 付加構造物を複合して用いる場合には、L字型と鉛直壁型の弾性応答低減メカニズムの異なる二つを併用することで、両者の弾性応答低減効果の長所をそれぞれ生かすことができる。

(2001年2月14日受付)

謝辞

本研究は平成 11 年度に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。水理模型実験実施にあたってはエコー株式会社の粥川章氏、研究当時鳥取大学大学院の三加崇氏と池田宗弘氏にご尽力頂いた。ご協力頂いた方々に謝意を表す。

参考文献

- 1) Mamidipudi, P. and Webster, W.C.: The Motions of Performance of a Matlike Floating Airport, *Proc.Int'l Conf. on Hydroelasticity in Marine Technology*, 1994 年, pp.363-375.
- 2) 前田久明, 増田光一, 宮島省吾, 居駒知樹: 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 年, pp.203-212.
- 3) 居駒知樹, 増田光一, 前田久明: 超大型浅喫水浮遊式構造物の弾性応答に関する研究, 第 13 回海洋工学シンポジウム論文集, 1995 年, pp.185-192.
- 4) Kashiwagi, M.: A B-Spline Galerkin Method for Computing Hydroelastic Behaviors of a Very Large Floating Structure, *Proc. of Int'l Workshop on Very Large Floating Structures, VLFS'96*, 1996 年, pp.149-156.
- 5) Takaki, M.: On Motion Performance of a Huge Floating Structure in Waves, *Proc. of Int'l Workshop on Very Large Floating Structures, VLFS'96*, 1996 年, pp.157-164.
- 6) 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 年, pp.209-220.
- 7) Yasuzawa, Y.: Wave Response Analysis of a Flexible Large Floating Structure, *Proc. of Int'l Workshop on Very Large Floating Structures, VLFS'96*, 1996 年, pp.221-228.
- 8) 村井基彦, 影本浩, 藤野正隆: 超大型浮体の波浪中弾性挙動の推定法について(第 2 報), 日本造船学会論文集, 第 181 号, 1997 年, pp.123-134.
- 9) 大松重雄: 超大型ポンツーン型浮体の波浪中応答計算, 日本造船学会論文集 第 182 号, 1997 年, pp.329-340.
- 10) 永田修一, 吉田尚史, 一色浩, 大川豊: 超大型弾性平板浮体の波浪中挙 解析, 日本造船学会論文集, 第 182 号, 1997 年, pp.285-294.

- 11) 瀬戸秀幸: 超大型浮体式構造物における規則波中弾性応答の理論解析, 日本造船学会論文集, 第 184 号, 1998 年, pp.231-241.
- 12) Utsunomiya, T., Watanabe, E. and Eatock Taylor, R.: Wave Response Analysis of a Box-like VLFS Close to a Breakwater, *Proc. of 17th Int'l Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 1998.
- 13) 大松重雄: 防波堤が存在する場合のポンツーン型超大型浮体の波浪中弾性応答計算法(その 2), 日本造船学会論文集, 第 186 号, 1999 年, pp.193-199.
- 14) Ohta, H., Torii, T., Hayashi, N., Watanabe, E., Utsunomiya, T., Sekita, K. and Sunahara, S.: 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*, 1999 年, pp.265-272.
- 15) 飯島一博, 白石悟, 珠久正憲, 井上俊二, 田中一郎: 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, *海洋開発論文集*, Vol.16, 2000 年, pp.215-220.
- 16) 飯島一博, 鈴木英之, 吉田宏一郎: 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.
- 17) 森平倫夫, 柿崎秀作, 合田良実: カーテン防波堤とその特性について, *港湾技術研究所報告*, Vol.003 NO.01, 1964 年, pp.1-27.
- 18) 運輸省港湾局: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(下巻), 社団法人日本港湾協会, 1999年, p. 621
- 19) J.S.Goo and K.Yoshida: A Numerical Method for Huge Semisubmersible Response in Waves. *SNAME Transactions*, Vol.98, 1990.
- 20) H.Kagemoto and Dick K.P.Yue: Interactions among Multiple Three-Dimensional Bodies in Water Waves. *J.Fluid Mech.* Vol.166, 1986.

付録 数値計算法

本論文で用いた数値解析理論は著者らのうちの一人が中心となって開発したものである^{16,19)}。ここでは理論概要を示す。

(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。ただし, 時間に関する項 $e^{-i\omega t}$ を除いて表記している。例えば時間微分する場合には, $-i\omega$ が加わることになる。式(1)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。

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

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

式(1)を次のような行列表示に書き直すことができる。

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

ある要素浮体 j への入射は, 平面入射波 ϕ_0 と j 以外の要素浮体からの散乱の和で表される。

$$\phi_0 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \{A_i\}^T \{\psi_i^D\} \quad (5)$$

個々の要素浮体に注目した時に, 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が導かれる²⁰⁾。

$$\{A_j\} = [B_j] \left(\{a_j\} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N [T_{ij}] \{A_i\} \right) \quad (j=1 \sim N) \quad (6)$$

式(6)中で, $\{a_j\}$ は平面入射ポテンシャル ϕ_0 を要素浮体 j に関する円筒関数で表した時の係数であり, $[T_{ij}]$ は局所座標系 i から j への座標変換行列を示す。同様に, 要素浮体が動揺する場合には, 次式が成立する。

$$\{A_j\} = [B_j] \left(\{a_j\} + \sum_{i=1}^N [T_{ij}] \{A_i\} + \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^M -i\omega\eta_{il} [T_{ij}] \{R_{il}\} \right) \quad (j=1 \sim N) \quad (7)$$

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 ϕ_i^R は複素変位振幅 η_{il} により、

$$\sum_{l=1}^M -i\omega\eta_{il} \{R_{il}\}^T \{\psi_i^D\} \quad (8)$$

で表されることを用いている。また、式(6)中の $\{R_{il}\}$ は要素浮体 i の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り、散乱特性行列 $[B_i]$ と同様に要素浮体の形状と周波数のみに依存する。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、 $[B_i]$ および $\{R_{il}\}$ を決定している。式(8)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。

流体の場が得られると、ベルヌイの定理を介して、浮体構造に働く線形波力 p が得られる。流体の密度を ρ とし、仮に着目する没水部が要素浮体 j 上であるとすると、

$$p = i\rho\omega \times \left(\phi_0 + \phi_j^D + \phi_j^R + \sum_{i=1}^N \{A_i\}^T \{\psi_i^D\} + \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^M -i\omega\eta_{il} [T_{ij}] \{R_{il}\} \{\psi_i^D\} \right) \quad (9)$$

圧力および圧力を没水浮体表面で積分した荷重は変位 η_i と係数ベクトル A_i を含んだ形で与えられることがわかる。このような荷重ベクトルを $F(A, \eta)$ のように表記する時に、浮体構造の運動方程式は次のように表すことができる。

$$\left(-\omega^2 [M] - i\omega [C] + [K_r] + [K_s] \right) \{\eta\} = F(A, \eta) \quad (10)$$

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原力マトリックス、 $[K_s]$ 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(7)と式(10)を用い

て、係数ベクトル A_i と、 η_{il} 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 ($i=1 \sim N$) と η 、すなわち外力と応答が同時に解かれる。ただし、この時に未知数を減じて解析時間を減じるために、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。

変位 η が求められると、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 ($i=1 \sim N$) 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。

(2) モデル化の例

(1) で概説した解析手法は本来、要素浮体が離散的に配置された、いわゆるセミサブ型の浮体構造に適用するためのものである。ポンツーン型の浮体に適用する場合には、浮体を複数の要素浮体に分割して、密接した多数の要素浮体間の相互干渉モデルとして解析を行う。この時のモデル化の例について三次元モデルの L 字型について、図-39 に示した 220 個の浮体間の相互干渉問題として取り扱っている。また、要素浮体単体としての散乱特性を得る際には、特異点分布法を用いている。この時のパネル分割の例について、図-40 に示した。各パネルは矩形としており、L 字型の部分で約 400 パネル、箱浮体の部分で約 250 パネルに分割している。

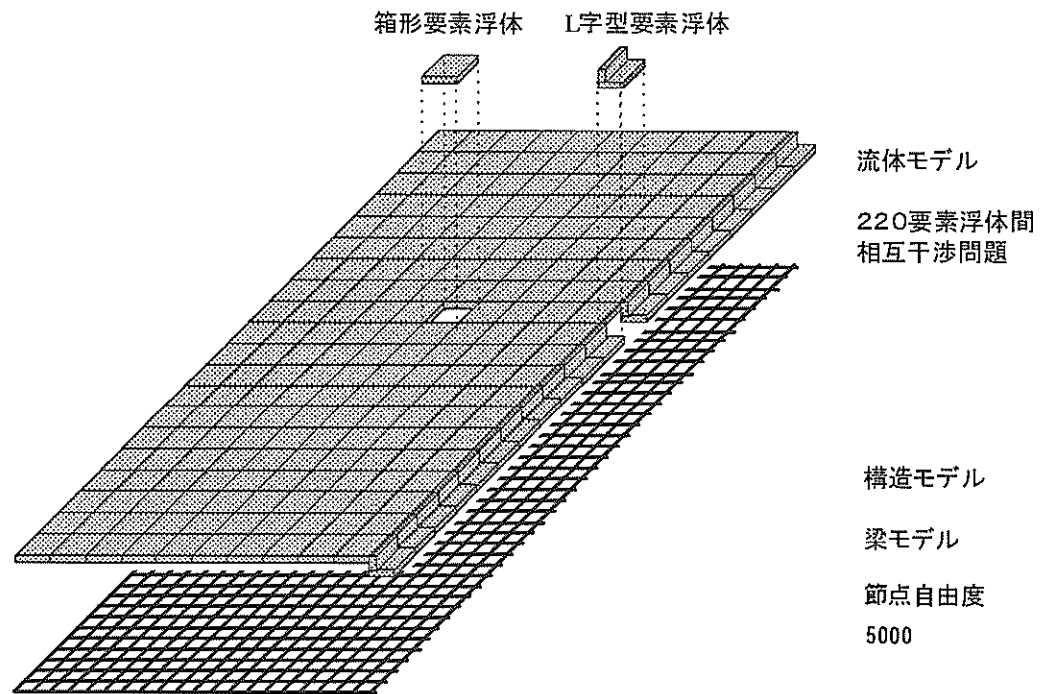


図-39 三次元浮体構造モデル化の例

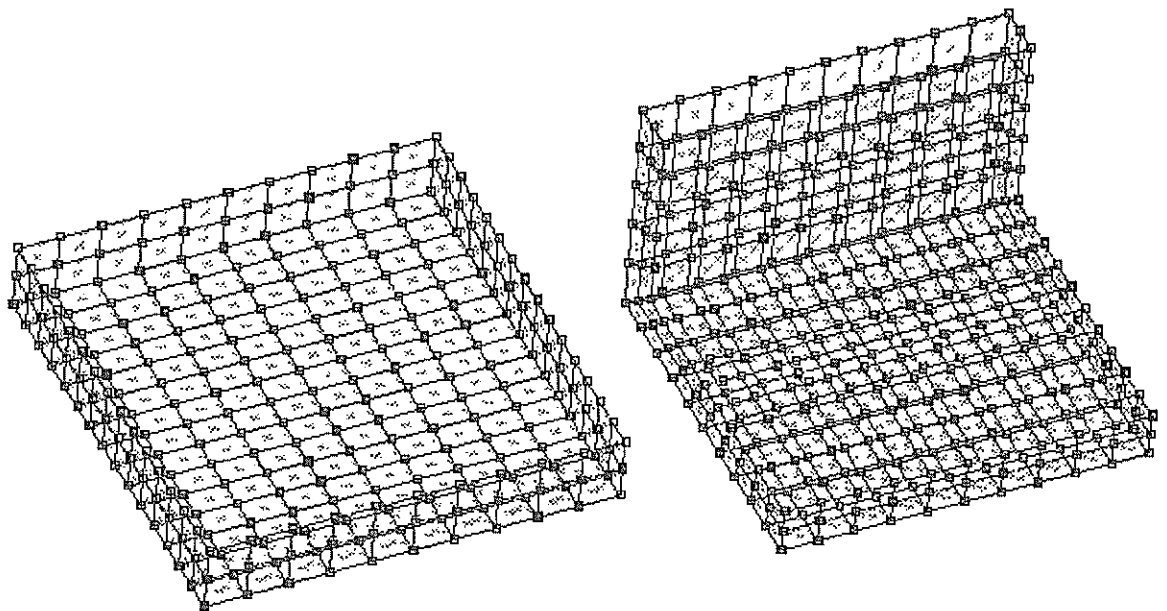


図-40 要素浮体パネル分割例