

付加構造物を用いた大型浮体の弾性応答低減の特性

飯島一博*・白石 悟**・珠久正憲***
 井上俊司****・田中一郎*****

1. ま え が き

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る一方で、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 秒を越える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を試みる。まず、二次元水路における水理模型実験を行い、付加構造物による応答低減効果を確認し、数値計算手法の検証を行う。この数値計算手法は著者のうちの一人が中心となって開発されてきたものであり、線形の範囲では厳密に、任意形状浮体に適用できるという特徴を持つ(飯島他, 1997)。付加構造物による大型浮体の応答低減については、実験による基礎的な検討は行われているものの(Ohta 他, 1999)、応答低減のメカニズムなどについて、理論的検討を十分に行ったとは言い難い。本論文では、数値解析手法を用いて、付加構造物による大型浮体応答の低減のメカニズムを調べる。また、パラメトリックに付加構造物の形状を変化させて応答の変化を調べることで応答低減の特性を明らかにする。

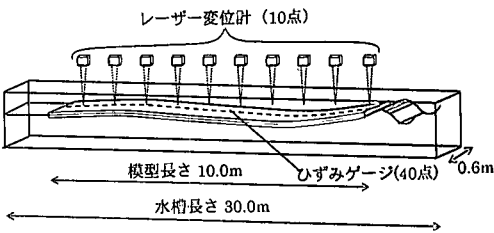
2. 水理模型実験と数値計算手法の検証

(1) 水理模型実験の概要

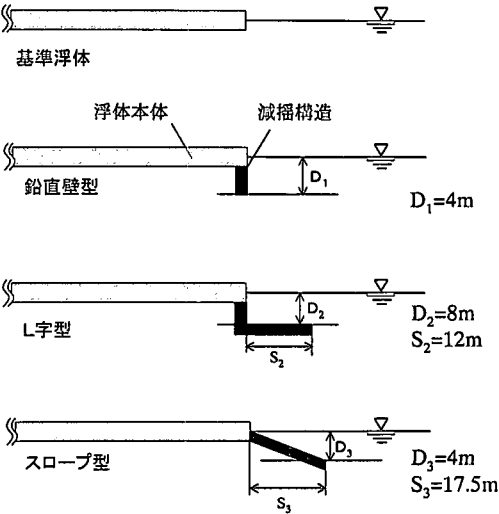
港湾技術研究所大型水工実験場の二次元造波水路にて水理模型実験を行った。水路長さは 30 m、幅 0.6 m であり、水深は 0.6 m とした。有効波の考えから、浮体前面からの反射波及び水槽後部からの反射波が再び浮体に入射しない範囲の時間で計測を行い、また、この時間が最

表一 水理模型諸元

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	中央構造
等価板厚 t (m)		0.02	0.012



図一 水理模型実験概説図



図二 付加構造物形状

* 正会員 工博 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 海洋構造研究室
 ** 正会員 工博 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 海洋構造研究室長
 *** 工博 三菱重工業(株)船舶・海洋事業本部
 **** 工修 三菱重工業(株)船舶・海洋事業本部
 ***** 川崎重工業(株)船舶事業部

も長くなるように、浮体を水槽中央部に配置した。

付加構造物のない浮体（以後、基準浮体と呼ぶ）の実験模型の主要寸法を表-1に、概略図を図-1に示した。表中には縮尺を1/50とした場合の仮想的な実機についての諸元についても示した。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。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。また、本図に示すようにレーザー式変位計で10点について上下方向変位を、ひずみゲージによって40点についてひずみを測定する。

付加構造物の形状を図-2に示す。本図中には仮想的な実機における付加構造物の寸法も示されている。本実験で試みた付加構造物は、鉛直壁型、L字型、スローブ型の四種類である。鉛直壁型の付加構造物を取り付けた浮体を、単に鉛直壁型と呼ぶこととし、以下同様とする。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ている。

(2) 数値解析手法の概要

ここで用いる数値計算手法は著者のうちの一人が中心となって開発したものである。本来は半潜式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、いわゆる流弾性を取り込んでいる。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解析することができる。

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くことで、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を行うことができる。

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を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、水路の壁面を考慮した（飯島他, 2000）。

(3) 結果及び考察

代表的な結果例として、図-3に基準浮体とL字型の入射波振幅当たりの変位振幅分布を、図-4に入射波振幅当たりのひずみ振幅分布を示す。なお、実験は仮想的な実機換算で波高4mと7mについて行ったが、広い周期に渡って波高に関する線形性が確認されたので、実験結果は波高4mのときの値のみを示す。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10s程度

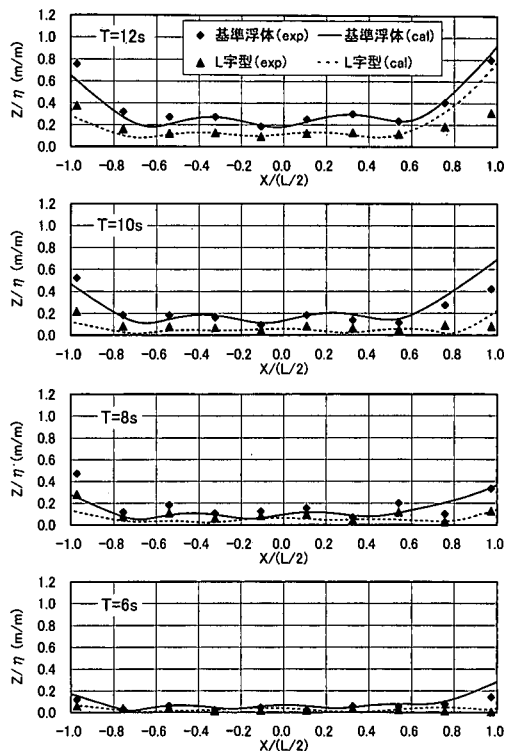


図-3 上下変位振幅分布比較

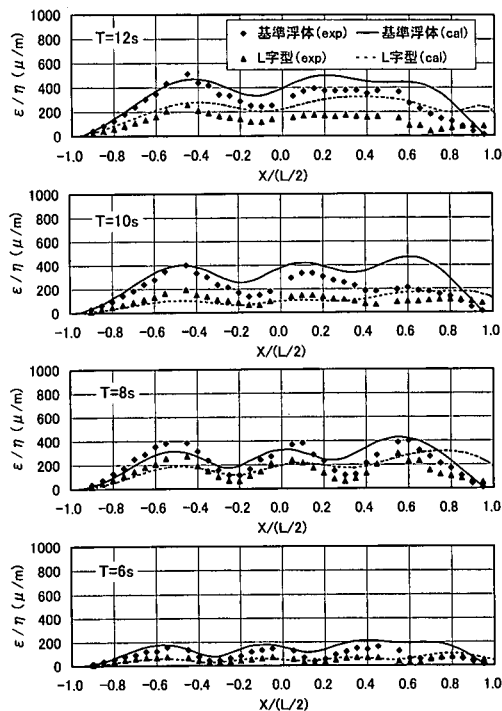


図-4 ひずみ分布比較

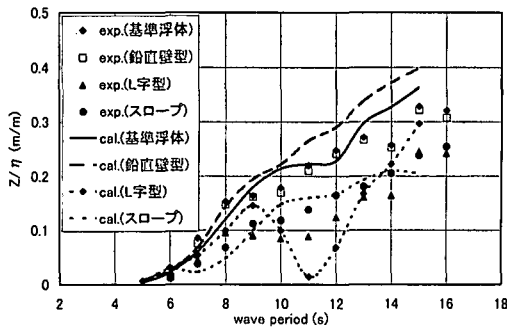


図-5 各種付加構造物を付した場合の浮体応答の周期特性

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程度に低減することがわかる。その一方で、例えば周期8sの応答についてはそれほど低減されていない。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く、各周期における付加構造物による応答低減の特性を数値計算はよく再現しているといえる。付加構造物による効果を含めた大型浮体応答について、解析手法の検証ができたといえる。

図-5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曲線として示した。なお、実験値は周期6sから14sのものについては、波高4m相当のものを、周期15s, 16s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広い周期範囲に渡って、応答低減効果が高く、特にL字型は10s~11s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確認される。今回用いた鉛直壁型の場合には、実験値では、基準浮体との差はほとんどなく、数値計算では長周期側でむしろ鉛直壁型の応答の方がやや大きく計算されており、応答低減効果は小さい。

3. 数値実験

(1) 応答低減のメカニズム

鉛直壁型付加構造物による応答低減はディフラクション効果で説明される。一方で、L字型付加構造物の弾性応答低減メカニズムについては以下の3つが主たる要因として考えられる。

①付加構造物前面での反射に代表されるディフラクションによる効果。②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る減衰の効果。③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。実際にはこれらの効果の複合的な作用によって応答低減が生じていると考えられるので、効果の明確な分離は容易ではない。その一方で、どの要因が最

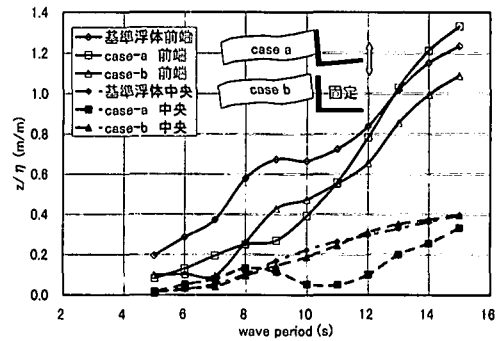
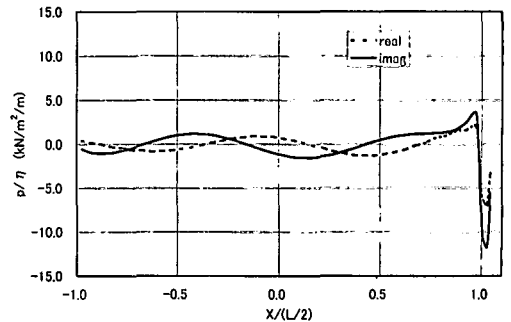


図-6 各ケース浮体応答の周期特性

図-7 浮体上圧力瞬時値分布 (周期 $T=10$ s)

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。

①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計算(case a)との比較を行う。

図-6に周期応答曲線を用いて、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おり、今回のL字型付加構造物による応答低減効果は①のディフラクションによる応答低減が支配的ではないことがわかる。

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10sにおける動的圧力の瞬時値分布を図-7に示した。破線 real で示される曲線はある瞬間の圧力の分布を、実線 imag で表される曲線はそれから位相が90度だけずれたとき、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。

また、②の造波減衰は同調時の応答低減の説明に用いることができても、今回のような非同調時応答の低減の要因として適当ではないと考えられる。以上から、L字型付加構造物の弾性応答低減は主として③の波強制力の打ち消し合い効果によって生じていると結論される。

(2) 応答低減特性

付加構造物の諸元の変化が応答特性に与える影響について調べる。これまでは二次元的な検討のみを行ったが、実際の構造物は三次元的である。そこで以下では平面的な広がりをもつ構造を考える。浮体長さ L は 1000 m、幅 B は 500 m とし、浮体の側部一列に付加構造物が付いていることを想定し、付加構造物側から幅方向に波が入射することを考える。また、当初の目的が曲げモーメントなどの構造応答の低減であるので、ここでは浮体中央曲げモーメントを代表する中央部ひずみに注目した。

図-2の鉛直壁型構造物の形状パラメータ D_1 を変化させて鉛直壁型付加構造物による大型浮体応答の低減特性について調べる。 D_1 は 10 m, 20 m, 30 m の3ケースである。図-8に浮体中央部での上下変位応答特性曲線を示した。鉛直壁の鉛直方向の長さ D_1 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の水理特性から容易に予想される定性的性質であるといえる。

次に、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L字型付加構造物による大型浮体応答の変化について調べる。図-9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 6 m のときに、応答低減効果が最も大きく表れるのは、10 s 前後であるのに対して、深さ D_2 が 16 m になる場合には、8 s 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、波の浅水影響で説明される。波圧の分布は入射波波長と付加構造物の形状でほぼ決定されていると考えられ、付加構造物の寸法と入射波波長にある関係があるときに、波強制力の打ち消し合いの効果が高くなると思われる。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则认为られる。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れば、このときの波周期は深さ 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

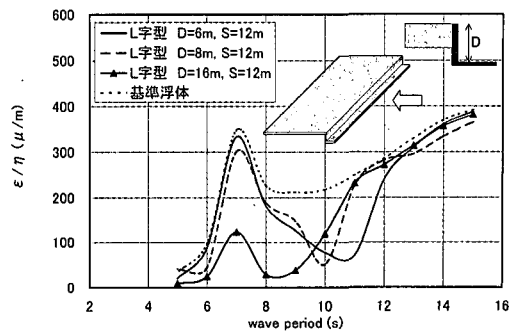


図-9 L字型の浮体中央部ひずみ応答比較 (D の変化)

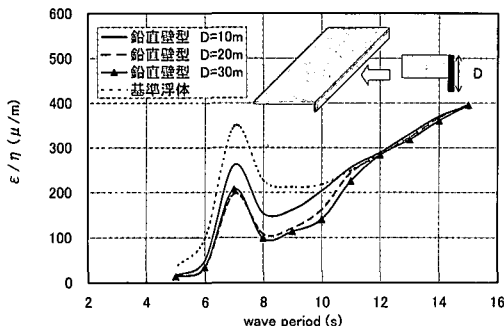


図-8 鉛直壁型の浮体中央部ひずみ応答比較

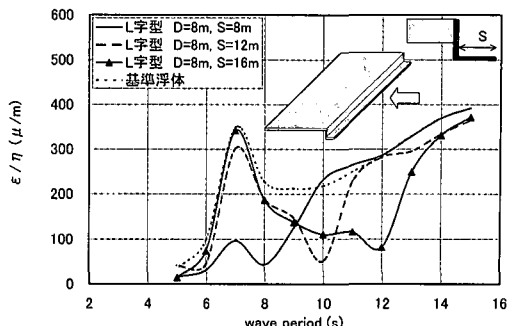


図-10 L字型浮体の浮体中央部ひずみ応答比較 (S の変化)

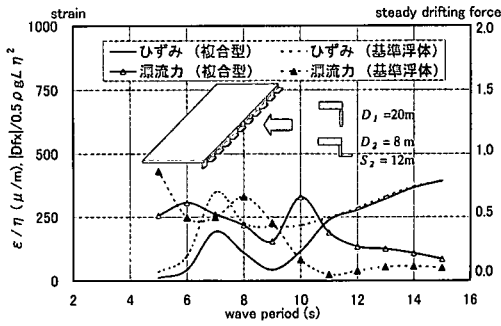


図-11 複合型ひずみ応答特性および漂流力特性

をより反射するので応答低減効果は大きくなる。

図-10 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ひずみ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わかる。長さ S_2 が 8 m である場合には周期 8 s 付近で応答低減効果が大きく、長さ S_2 が 16 m の場合には、12 s 付近で応答低減効果が強く表れている。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すると考えられ、より長周期側で応答低減効果が大きくなると説明される。また、応答低減効果が強く生じるのは、波長と付加構造物寸法の関係については、深さ D_2 における波長が没水水平部長さ S_2 の 6~7 倍のときであるといえる。

(3) 複合的な付加構造物の利用

次に、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 50 m として、交互に配置している。図-11 に数値計算結果を示した。

波強制力の打ち消し合い効果によって、8 s から 11 s 付近で応答低減効果が大きくなる L 字型の応答特性と付加構造物前面での反射によって、8 s 以下で応答低減効果のある鉛直壁型の応答特性が複合的に表れており、広い周期範囲では応答が半減している。このように応答低減のメカニズムの異なる二つの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。

図-11 には漂流力についても合わせて示しており、付加構造物を取りつけることで弾性応答を低減できる一方で、波漂流力が増加することがわかり、特に弾性応答を低減する周期近傍で、漂流力は大きくなるということがわかる。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ことが指摘される。

4. あとがき

本研究で得られた結論は次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、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。

3) 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 倍程度になるとき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。

4) 付加構造物を複合して用いる場合には、L 字型と鉛直壁型の応答低減メカニズムの異なる複数を併用することで、それぞれの応答低減効果の長所を生かすことができる。

5) 付加構造を取り付けると、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が大きくなり、その結果として波漂流力が大きくなる。

謝辞：本研究中で行われた水理模型実験は平成 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株式会社エコーの粥川章氏、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る。

参考文献

- 飯島一博, 鈴木英之, 吉田宏一郎 (1997): 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, pp. 281-288.
- 飯島一博, 白石 悟, 珠久正憲, 井上俊二, 田中一郎 (2000): 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, pp. 215-220.
- Ohta, H., T. Torii, N. Hayashi, E. Watanabe, T. Utsunomiya, K. Sekita and S. Sunahara (1999): 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.