

大型浮体の動揺および反射波低減工に関する模型実験

平石哲也*・奥野光洋**・宮里一郎***

弾性を有する長大浮体では、浮体吃水と同程度の波浪が来襲すると浮体端部の動揺量が大きくなり、安定性に問題が生じる。そこで、長大浮体の動揺低減を図るために、開口率20%のスリット型動揺低減工を開発し、その効果を模型実験で検討した。長さ750 mの長大浮体の1/50縮尺模型を多方向不規則波も造波できる平面水槽に設置して、浮体動揺量と係留力を測定したところ、従来から提案されてきた水平板式と同程度の動揺低減効果を有することが判明した。またスリット式動揺低減工を取り付けた浮体の係留力は水平板式より小さくなり、浮体からの波の反射率は、0.5程度まで小さくすることができた。

1. はじめに

建設工期が短い海上施設として大型の長大ポンツーン¹⁾の設置が注目されており、メガフロートと呼ばれる小型海上空港の実証実験も実施されてきた(メガフロート技術研究組合, 2000)。著者(平石ら, 2003)も、羽田空港の再拡張案の一試案として大型浮体式空港を検討し、半没水型浮体とポンツーンを組み合わせた複合浮体構造の動揺量と周辺²⁾の海象に与える影響を検討してきた。今後も波浪条件などが適している海域において早急に設置できる小型空港や海上防災基地などに活用されるものと期待できる。

ポンツーン型大型浮体は構造が単純で、メンテナンスコストなどを除くと設置条件によっては、工費が比較的小さいという長所を有するが、作用波高が吃水と同規模になると浮体端が水中より浮き上がり、スラミング現象によって上下動が大きくなってくる。また、短周期波作用時に直立壁面で反射波が顕著に生じて、周辺海域へ影響を及ぼす短所を有する。これらの短所を無くし、長大浮体の現地適用性を高めるために、これまでに2次元水路実験によって、フィン式の水平板やスカート式の垂直板による動揺抑制実験がなされてきた(Ohtaら, 2002, 正信ら, 2003)。しかし、実際の海の波を再現した多方向不規則波での動揺低減効果については検討されていない。反射波の有無については、2次元実験時に反射率として整理されているものの、実海域に近い状態での平面水槽による反射波の特性調査もなされていない。また、水平板を取り付けると波漂流力に対応して係留力が増加することが知られている(島田ら, 2002)。

加えて動揺対策工として水平板や鉛直板を箱型浮体に取り付け点ると、接続部に応力集中が生じるので、施工が難しくなる場合もある。そこで、より施工性が高く、

動揺低減や消波を目的とする構造を検討しておく必要がある。本研究では、ポンツーン壁面に等間隔で三角型スリット材から成る消波工を取り付け、浮体の動揺量と波反射率を低減させる工法を提案し、本工法の適用性を多方向不規則造波水槽で調べることを目的とした。

2. 模型実験の内容

(1) 波浪条件と動揺低減工

図-1に1/50縮尺で製作したポンツーン式浮体模型の水槽内の配置を示す。浮体の長さ、幅、喫水は現地量で、750 m, 150 m および1.8 mで、規則波の作用波高・周期は、 $H = 2 \sim 4$ m, $T = 6 \sim 16$ sである。不規則波は東京湾の設計波を参考に、 $T_{1/3} = 8.2$ s, $H_{1/3} = 4.2$ mで、方向集中度 $S_{max} = 10$ の光易型方向関数と JONSWAP 型スペクトルを有する多方向不規則波とした。水槽内における多方向不規則波の特性と造波法については、文献(Hiraishiら, 1998)を参照されたい。実験では浮体の長軸方向を0度とし、反時計回りを正として、波向 θ を45~90度に変化させた。

長大ポンツーンは‘たわみ’を有する。本研究では、メガフロート実験の数値を参考に目標曲げ剛性を仮定し、模型ではアルミ板と発泡スチロールを張り合わせて‘たわみ(曲げ剛性)’を再現した。また、発泡スチロール板の下部に硬質スポンジで製作したフロートを取り付けて浮力を持たせ、吃水を調整した。表-1に実物と模型の目標曲げ剛性を示す。さらに模型完成後に静水中に浮かべて集中荷重載荷試験を行って、鉛直ひずみを測定し、曲げ剛性を算出した。表中には載荷試験から求めた曲げ剛性も示しており、目標値との誤差は10%以内で、ほぼ目標とする浮体剛性が再現されている。

浮体動揺と反射波低減用消波工は、直立消波ケーソン堤のスリット壁を模した幅5 m, 高さ7 mの三角形スリット材を浮体壁面に多数取り付けた構造で、スリット隙間の空隙率は20%である。図-2に模型サイズで示したスリット式消波工を示す。本研究では比較のため、動揺抑制工として効果が大きいフィン式水平板についても実

* 正 博士 (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部

** (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部

*** 正 修士 (株)エコー 沿岸海洋部

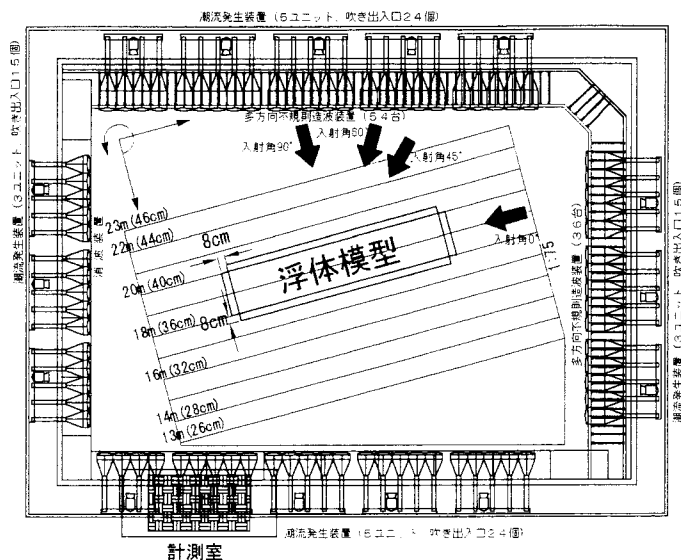
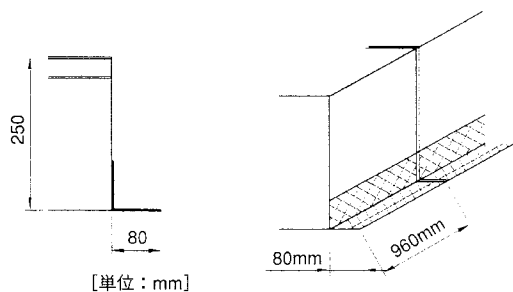


図-1 水槽と模型浮体の配置

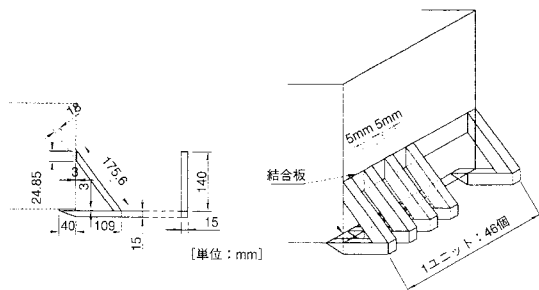
表-1 浮体の曲げ剛性

EI (kNm)	実機曲げ剛性	模型目標値	模型測定値
長軸方向	6.610E+08	1.088E+02	1.531E+02
短軸方向	6.610E+08	1.088E+02	1.272E+05

* 模型目標値は材料の制限を受けるので、実機換算値とは若干異なる。



(1) フィン式水平板



(2) スリット式消波工

図-2 提案したポンツーン動揺低減法

験を行う。水平板の幅は図-2に示すようにスリット消波工と同一とした。水平板と消波工は浮体に張り付けているので、浮体剛性を決めるアルミ板剛性には影響せず、全周に取り付けて全波向に対応できるものとした。

(2) 測定項目と測定手法

実験では、比較のために(i)対策工のない単純ポンツ

ーン、(ii)2次元実験で提案されているフィン式水平板と(iii)三角スリット型消波工を有する改良浮体を用いた。まず所定の波高、周期、波向を有する規則波を模型に作用させ、3タイプの浮体について、浮体の上下動（ヒービング動揺量）、浮体前後の係留力、浮体周辺の波反射率を測定し、改良型浮体の優位性を調べた。図-3は、浮体周辺の計測装置の配置図で、浮体上に2列測点を設け、非接触型レーザー変位形で鉛直動揺量を求めた。したがって測定値には浮体動揺成分のヒービングとローリング等の効果が含まれ、純粋にヒービング動揺量だけを取り出したわけではない。係留力は浮体の長側面に2カ所（M-2, 3）、短側面に1カ所（M-1）係留バネを介してロードセルを取り付けて測定した。以下の整理では、同規模の矩形浮体に作用する次式の規則波漂流力の最大値 F_D で除して無次元量で係留力を示した（たとえば、小山ら, 1997）。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho g \left(\frac{H_{1/3}}{2} \right)^2 L_a \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 ρ は海水密度、 L_a は浮体長さ（750 m）である。

規則波に続いて、現地で想定される異常時の多方向不規則波を作用させ、同様の解析を行って、改良型浮体の現地適用性を調べた。

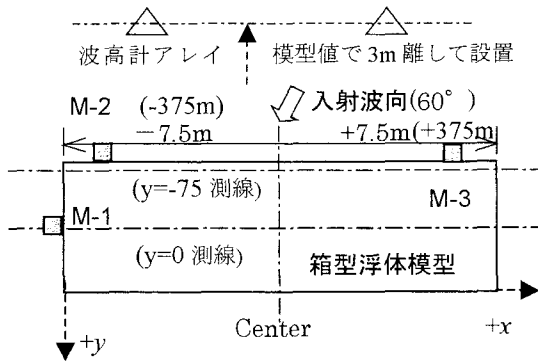
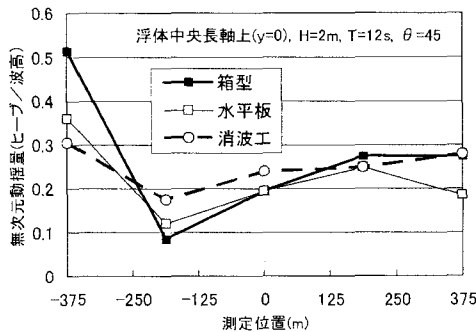


図-3 浮体模型周辺の計測点の配置

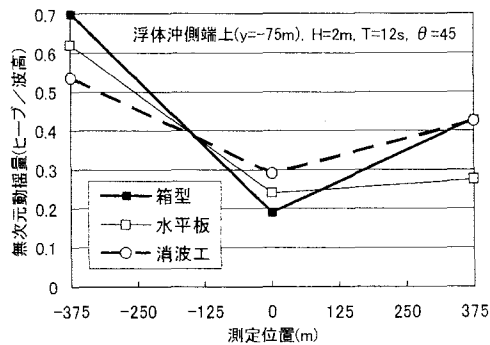
3. 実験の結果

(1) 浮体変位の変化

図-4に作用波高で無次元化した浮体各部の上下動振幅を示す。代表として波向45度の場合を示した。波の下手側、すなわち $x = -375\text{ m}$ の位置で動揺量は大きく、長軸上でも箱型の場合には動揺量は波高の50%程度になる。水平板や消波工を取り付けた改良型浮体では、浮体端部の動揺量を小さくすることが可能で、動揺低減効果が



(1) 浮体中央長軸上(y=0)測線



(2) 浮体沖側側壁位置(y=-75)測線

図-4 無次元上下動揺量の変化

を発揮している。

図-5は、動揺が顕著になる浮体の波下手側端部の上下動を異なる周期と波向と比較したものである。作用波の周期が長くなる程、波向が直角($\theta = 90^\circ$)に近くなるほど、浮体の動揺量は大きくなる。また、改良型浮体と箱型の動揺量の差も動揺が大きくなり、動揺低減工の効果が顕著になる。同じ波条件では水平板の動揺低減効果が、スリット消波工より大きい。

図-6は波高を4mに増大させて、水平板と消波工タイプの差を示したものである。波向は90度で、動揺量が大きい側面の3測点の動揺振幅を平均して示した。T=6sの場合には両者の差は小さいが、周期が長くなると両者の差は大きくなり、ほぼ20~30%程度水平板の方が動揺量が小さくなる。

図-7は、多方向不規則波作用時の無次元動揺量を比較したもので、長軸上の動揺振幅の最大値と有義値を比較している。水平板とスリット式消波工を比較すると、動揺振幅は水平板でやや小さくなっている。波下側では最大振幅は同じになるが、水平板がやや有利になっている。ただし、両者の差は10%以内で、スリット消波工タイプも水平板と同程度の動揺低減効果を有している。

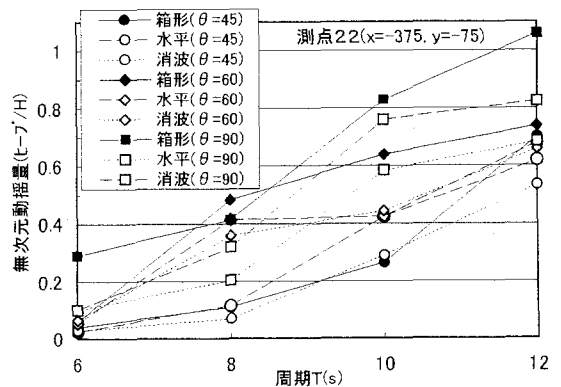


図-5 波向と周期による動揺低減効果の変化

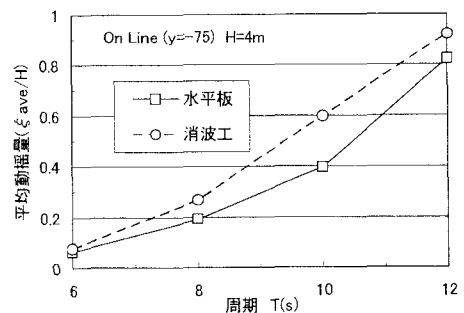


図-6 波高増大時の改良型消波工の効果

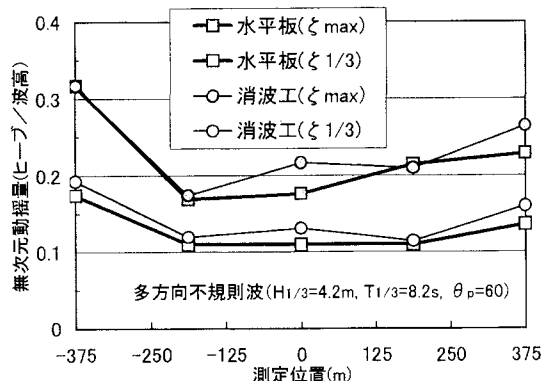


図-7 多方向不規則波作用時の浮体動揺量

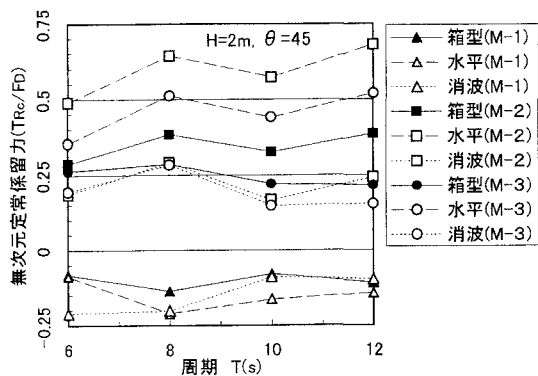
(2) 係留力の変化

次に係留力を調べた。図-8は、規則波作用時の定常漂流力の作用による定常係留力の比較で、浮体の長軸方向の変位を拘束するM-1に作用する力は小さい。波向が45度および60度の場合には、側面での係留点M-2およびM-3点での作用力は異なり、これは浮体の水平面での回転運動の影響と考えられる。波向が90度の場合には浮体の回転は小さくなるので、M-2とM-3に作用する係留力は等しくなる。実験で調べたすべてのケースで、水平板をつけた浮体に作用する係留力が最も大きく、箱型と消波工タイプでは、係留力の相違は小さくなった。特に波向が45度の場合には、箱形に比べても消波工タイプに作用する係留力が小さくなり、係留設計には適している。

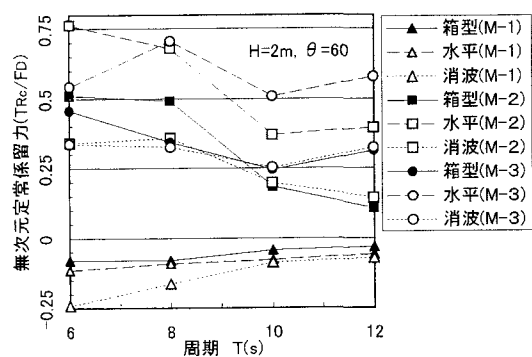
動揺量と係留力の測定結果から、改良型浮体の動揺量は箱型よりも小さく、水平板や消波工が浮体動揺量の低減に適切で有ることが分かる。両者の差は小さく、消波工タイプは水平板と同様な動揺低減効果を示している。一方、係留力を比較すると、水平板タイプは明らかに箱型より係留力が増加し、浮体設計には不利になる。消波工タイプは水平板より係留力は小さく、波向が斜めになると箱型よりも係留力が小さくなるので、係留力を増加することなく動揺量の低減を図ることができ長大浮体の安定性に効果的であることが分かる。

不規則波が浮体に作用すると、定常漂流力に加えて変動漂流力が発生する。変動漂流力の振幅が大きくなると定常漂流力に加わって大きな係留力が発生し、浮体係留装置の設計に大きい影響を与える。測定係留力にも定常成分と長周期の変動成分が現れるので、不規則波作用時には、定常係留力 T_{RC} と変動成分 T_{RS} に分離して、それぞれ解析し、変動成分から有義値と最大振幅を求めた。

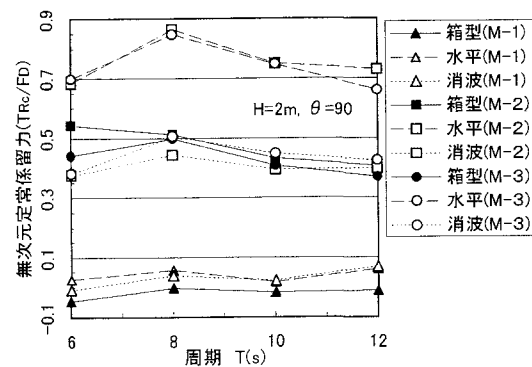
図-9は、M-2およびM-3に作用した係留力から求めた T_{RC} と T_{RS} の平均値を示したものである。 T_{RC} に比較す



(1) 波向が45度の場合



(2) 波向が60度の場合



(3) 波向が90度の場合

図-8 定常係留力の比較

ると T_{RS} は大きくなり変動漂流力の算定が設計には重要でることが分かる。変動成分の有義振幅 $T_{RS1/3}$ および最大振幅 T_{RSmax} を比較すると、いずれも消波工タイプが水平板タイプより小さくなり、多方向不規則波の場合でも、消波工タイプが係留力軽減に有利である。スリット型対策工は、水平フィン式より大きい動揺低減効果を有する一方、係留力の最大値は小さくなるので、動揺対策工と

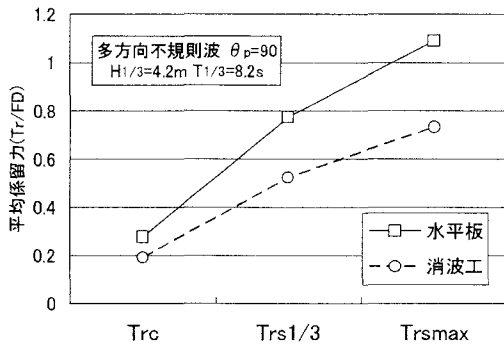


図-9 多方向不規則波作用時の係留力

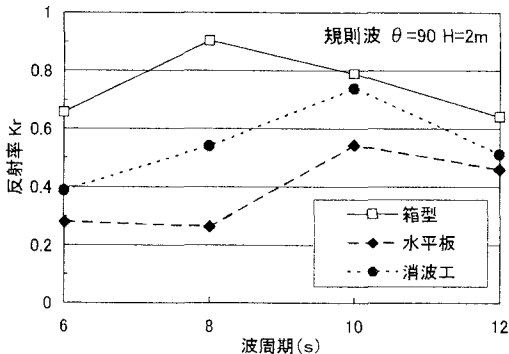


図-10 反射率の変化

して適している。

反射率 K_r の波周期による比較を行った。図-10に規則波作用時の反射率を浮体前面の波高計アレイで測定した結果を示す。反射率測定アレイは、図-3で示したように浮体から3m離して造波機側に設置し、2カ所で測定して、その平均値を採用した。波向90度で比較すると、反射率は箱型が最も大きくなった。例えば $T=8$ sでは、箱形 $K_r=0.90$ 、水平板 $K_r=0.26$ 、消波工 $K_r=0.5$ となり、水平板式が最も消波効果が高くなる。ただし箱型に比べるとスリット消波工を付けることにより、反射率を1/2に低下させることが可能である。直立スリットケーソンの反射率は波長によって変化するものの、設計基準

では $K_r=0.4\sim0.6$ とされており、本研究で求めた消波工タイプの反射率は港内での直立消波ケーソン堤と同様になり、周辺に与える反射波の影響低減に効果を有する。

4. あとがき

本研究では、箱型長大浮体の動揺低減と反射波の抑制を目的として、三角型消波スリット工を浮体側壁に設置した。多方向不規則波造波水槽で斜め規則波と多方向波を作用させ、上下動揺量の変化を調べたところ、箱型に比較して、水平フィン式対策工と同程度の動揺低減効果を有することが判明した。係留力は、水平板では箱型より増加するのに反して、スリット消波工では、箱型とほぼ同一で、係留力の増加は見られなかった。また波反射率は、直立消波スリットケーソンと同様に0.5程度であった。したがって、スリット式消波工は係留力を増加させることなく、箱型浮体の動揺と波反射率を軽減することができ、実用的な対策工である。

最後に、本研究の機会を与えていただいた国土交通省関東地方整備局の皆様に感謝を表します。

参考文献

- 小山健夫・藤野正隆・前田久明(1997)：船体と海洋構造物の運動学，成山堂書店，pp. 166-169。
- 島田 潔・丸山文生(2002)：メガフロートに作用する変動漂流力モーメントの特性について，日本造船学会論文集，第192号，pp. 319-323。
- 正信聡太郎・加藤俊司・前田克弥・難波康広(2003)：波エネルギー吸収装置付きメガフロートの波浪中弾性応答，日本造船学会論文集，第193号，pp. 17-24。
- メガフロート技術研究組合(2000)：メガフロートの空港利用に関する実証的研究，166p。
- 平石哲也・奥野光洋・鈴木智浩・稲垣茂樹(2003)：海岸工学論文集，第50巻，pp. 826-830。
- Hiraishi T. (1998)：Applicability of dual face serpent-type wave generator, report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.37, No.4, pp. 3-35。
- Ohta M., M. Ozaki, M. Matsuura and S. Tanigaki(2002)：A study on progress in antiwave performance of Mega-Float, Proc. of the 12th Inter. Offshore and Polar Engineering Conf., Vol.3, pp. 282。