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

正員 正 信 聡太郎* 正員 加 藤 俊 司*
正員 前 田 克 弥* 正員 難 波 康 広*

Response of the Mega-Float equipped with wave energy absorbing device

by Sotaro Masanobu, *Member* Shunji Kato, *Member*
Katsuya Maeda, *Member* Yasuhiro Namba, *Member*

Summary

The hydroelastic response is significant from the viewpoint of the structural design of a Mega-Float. To equip a Mega-Float with some attachments, such as vertical plates, is one of the ways to reduce the hydroelastic response easily. Wave drift force acting on the Mega-Float may, however, be increased in general, when the Mega-Float is equipped with the attachments in order to reduce the response.

In the present study, we developed a novel attachment that was effective in the reduction in both hydroelastic response and wave drift force.

Further we estimated the response of Mega-Float equipped with the attachments, and compared the result with the data measured in the at-sea experiment. As a result, we confirmed both the effectiveness of the novel attachment and the validity of the estimation method.

1. 緒 言

メガフロートの強度上及び機能上の観点から最も重要であるのが弾性応答である。設置海域によっては、防波堤を設置して静穏海域を設けたり、没水部の形状を変化させるなどして弾性応答を低減する措置をとることが考えられるが、コスト的に不利になる場合があり、また前者については環境影響に関して浮体構造物である利点を失うことにつながる。

これまでの研究から、浮体波上側に付加構造物を設置することによって弾性応答を低減できることがわかっている¹⁾²⁾。しかし、一般に付加構造物が設置されると弾性応答を低減する一方で波漂流力が増大する。

本研究では、付加構造物に関する実験的な調査を行い、

弾性応答の低減と波漂流力の増大抑制の点から有効な付加構造物（以下、波エネルギー吸収装置と呼ぶ）を開発した。さらに、波エネルギー吸収装置が付いたメガフロートの波浪中弾性応答を推定して、実海域実証実験結果と比較・検証した。本稿では、開発した波エネルギー吸収装置の有効性ならびに応答推定法の妥当性について報告する。

2. 波エネルギー吸収装置の調査

2.1 実証実験浮体の概要

実証実験浮体は、Fig. 1に示すような長さ200m（公称値）、幅100m、型深さ3m、喫水1mのポンツーン型メガフロートである。また、浮体沖側側面に深さ1.5mの波エネルギー吸収装置（鋼製の付加構造物）を設置することによって弾性応答を低減する方式を採用した。浮体の主要目をTable 1に示す。

長さ方向の係留には空気式フェンダー（ABF800H）とゴムフェンダー（SUC1600H）を利用した縦列ハイブ

* 海上技術安全研究所

リッドフェンダーを、幅方向にはゴムフェンダー（SUC1700H）2基による縦列フェンダーを用いた、ドルフィン・フェンダー方式を採用した。

設置海域は、Fig. 2 に示した住友重機械工業株式会社・横須賀製造所の北岸壁沖である。ここは、水深が5m程度の浅い海域である。

Fig. 1 Schematic diagram of the Mega-Float used for at-sea experiment.

Table 1 Principal dimensions of the Mega-Float used for at-sea experiment

Length	L	200	m
Width	B	100	m
Depth	D	3.0	m
Draft (floating body only)	d	1.0	m
Draft (includes wave energy absorbing device)	d'	2.5	m
Bending stiffness	EL/B	2.08×10^9	$\text{kgf} \cdot \text{m}$
	EL/L	1.69×10^9	$\text{kgf} \cdot \text{m}$

Fig. 2 Location for at-sea experiment.

2.2 付加構造物によるメガフロートの弾性応答低減

尾崎らは、メガフロートの波上側端部に取り付けることによって弾性応答低減効果が得られる付加構造物に関して調査した¹⁾。代表的な形式を Table 2 に示す。これらのうち、実用性の点からは、カーテンウォール式、

L型、逆L型が有望である。本実証実験浮体の設置海域を考慮すると、比較的短周期域で動揺低減効果が有効な形状が望ましい。また、船舶等が付近を航行する可能性があるため、没水部が突出していると安全上の問題が生じる。以上のことから、カーテンウォール式と逆L型について検討した。

Table 2 Attachments to reduce hydroelastic response¹⁾

形 式	構造寸法	適用範囲		課 題
		短周期	長周期	
カーテンウォール式	小	○	×	水平動増大
没水平板型	中	○	△	施 工 性
タンク開口板型	大	○	○	コスト増大
没水ビーチ型	中	○	△	施 工 性
L型	小	△	◎	水平動増大
逆L型	小	◎	△	水平動増大

一般に、浮体に付加構造物を取り付けると波漂流力が増加する。これは、反射波エネルギーが増大するためである。したがって、弾性応答の低減と係留系への影響を考慮して波エネルギー吸収装置の形状を選定することが重要となる。

そこで、Fig. 3 に示した5種類の波エネルギー吸収装置に関して縮尺 1/50 の部分模型を用いた水槽実験を行い、弾性応答の低減及び波漂流力増加抑制の両面で有効な波エネルギー吸収装置の形状選定を試みた。これは、スリット部分で生じる造渦等の効果によってエネルギーを散逸して、反射波エネルギーを低減することを期待したものである。

Fig. 3 Attachments investigated in this study.

実験は海上技術安全研究所・極浅水流体力計測水路（長さ 22m×幅 0.5m×水深 0.5m）において行った。実験は Fig. 2 に示した細長の陰影部分を対象とした 2 次元実験であり、より実機に近い状態で計測するためにその部分の海底地形及び岸壁を水槽に再現した。入射波は、Fig. 2 の陰影部分の長辺に平行で岸壁に向かう波とした。上下変位計測にはポテンシオメータとプーリーによるトートワイヤー方式を採用した。また、模型前後を線形バネで係留しており、模型の水平方向変位から定常波漂流力を求めた。

浮体波上側端部における上下変位及び定常波漂流力の周波数特性を Fig. 4 に示す。なお、グラフは実機スケールで表しており、以降のグラフも全て実機スケールである。上下変位は最大で 0.4 程度である。波漂流力は長周期側で大きくなっている。一般に開水域中では波漂流力が長周期側で小さくなる傾向にあるため、長周期側で大きくなるのは岸壁及び海底地形の影響であると考えられる。設置海域の通常波である波周期 3～5 秒の範囲において、逆 L 型は他の形状に比べ弾性応答の低減効果が小さく、それ以外の形状はほぼ同程度の低減効果があることがわかる。一方、定常波漂流力の増加が小さいのはスリットがあるタイプであり、スリットが 0.25m を超えるとほぼ一定値に収束するようである。以上のことから、0.25m のスリットが付いたカーテンウォールが有効であると判断した。

Fig. 4 Comparison of the responses among some attachments.

3. 総合模型実験

3.1 目的

本実験の目的は、前節で選定した波エネルギー吸収装置の有効性の検証と、波エネルギー吸収装置付きメガフロートの弾性応答解析結果の検証である。

実験は、海上技術安全研究所・海洋構造物試験水槽（長さ 40m×幅 27m×試験時水深 0.8m）において行った。

3.2 供試模型

3.2.1 浮体模型

模型縮尺は 1/50 とした。模型の主構造には厚さ 5mm のアルミ平板を用いたので、曲げ剛性は実機の約 1/4 相当となっている。アルミ平板下面に浮力材として発泡ウレタンを接着して喫水を実機に合わせた。

浮体模型側面には、Fig. 5 に示すような深さ 1.5m、スリット幅 0.25m（実機相当）の波エネルギー吸収装置模型を取り付けた。

3.2.2 水理模型

実証実験浮体の設置海域には、Fig. 2 に示したように複雑な海底地形及び岸壁が存在する。そこで本実験では、アルミ板と鋼材を用いて設置海域の海底地形を再現した。Fig. 6 に水理模型の設置状況を示す。

3.2.3 係留装置模型

2 種類の特性の異なる線形ばねを組み合わせることによって実機係留装置の反力特性を再現した。縦列ハイブリッドフェンダー及び縦列フェンダーの反力特性を Fig. 7 に示す。また Fig. 8 に示すように、係留装置模型は上下変位を拘束しないよう浮体模型を係留している。

Fig. 5 Experimental model of the wave energy absorbing device.

Fig. 9 Measured items and their positions.

Fig. 10 Experimental set up (circular cason quay).

Table 3 Experimental conditions

Quay	Wave energy absorbing device	Slit	Wave	Wave period	Wave height	Wave direction
No (open sea)	No	---	Regular	3.2~6.4s	0.5~2m	0, 63.8, 75, 90°
	Yes	No				
	Yes	Yes				
Flat	No	---	Regular	3.2~6.4s	0.5~2m	63.8°
	Yes	Yes				
	No	---				
	Yes	No	Irregular	4.5, 5.5, 6.2s	1.8, 2.6, 3.4m	63.8°
	Yes	Yes				
Circular cason	No	---	Irregular	4.5, 5.5, 6.2s	1.8, 2.6, 3.4m	63.8°
	Yes	No				
	Yes	Yes				

3.5 実験結果

3.5.1 上下変位

開水域中での上下変位の周波数応答関数を Fig. 11 に示す。グラフ中には計算結果も示した。実験と計算は良い相関を示していることがわかる。波周期 4 秒以下ではほとんど動揺していない。

岸壁が平板の場合の結果を Fig. 12 に示す。開水域の場合に比べ、全体として応答が小さくなっている。これは、複雑な海底地形及び岸壁の影響であると考えられる。設置海域の通常波である波周期 3~5 秒の範囲では、実験と計算は良く合っている。波周期 5.7 秒以上では計算結果が応答を過大に評価している。

岸壁が円筒ケーソンの場合の結果は示していないが、岸壁が平板の場合とほとんど差がないことを確認している。

○ exp: No wave energy absorbing device — cal: No wave energy absorbing device
 ● exp: With wave energy absorbing device (no slit) — cal: With wave energy absorbing device (no slit)
 ◆ exp: With wave energy absorbing device (with slit)

Fig. 11 R.A.O. of vertical displacement (open sea).

○ exp: No wave energy absorbing device — cal: No wave energy absorbing device
 ● exp: With wave energy absorbing device (no slit) — cal: With wave energy absorbing device (no slit)

Fig. 12 R.A.O. of vertical displacement (flat quay).

Fig. 13 には、開水域中での上下変位の低減率 (= 波エネルギー吸収装置を付けたときの上下変位 / 波エネルギー吸収装置を付けないときの上下変位) を示した。短周期側で低減効果が顕著である。これはカーテンウォール式付加構造物の特長であり、本実証実験の設置海域では特に有効な形状であることがわかる。スリットのない

場合のほうが、スリットが付いている場合よりも低減効果が大きい、それほど差異はない。波向き 75° 、 90° の順で低減効果が大きく、設置海域の通常波である波周期 3~5 秒の範囲で、低減率の平均値を求めたところ、波向き 75° で 0.7 (30%の低減効果)、波向き 90° で 0.79 (21%の低減効果)であった。波向き 63.8° 以下では、波向きが小さくなるに従って低減効果も小さくなっていた。波向きが小さくなると波エネルギー吸収装置のない浮体側面からの波入射が増えるためであると考えられる。設置海域における波の主流方向を勘案して波エネルギー吸収装置の方向を決定すれば、更なる効果が期待できる。実験結果のほうが全体として波エネルギー吸収装置の効果が顕著であり、これは計算では考慮していない粘性影響等が原因であると考えられる。波向き 75° のとき低減効果が大きいのもこの粘性影響が原因として考えられ、実際に波向き 75° のほうが 90° に比べて計算結果との差が大きい。今後詳細な検討が必要であると考えられる。

Fig. 13 Reduction ratio of vertical displacement (open sea).

3.5.2 定常波漂流力

Fig. 14 に定常波漂流力の周波数特性を示す。スリットなしの波エネルギー吸収装置を設置した場合の波漂流力は、波エネルギー吸収装置がない場合に比べてすべての波周期で増大している。スリットの存在によって、ほとんどすべての波周期で波漂流力が減少していることが確認できる。また、ある波周期では波エネルギー吸

収装置を設置しない場合よりも波漂流力が減少していることが確認できる。

Fig. 15 に相対波高の周波数特性を示す。波漂流力の場合と同様、スリットなしの波エネルギー吸収装置を設置した場合の相対波高は、波エネルギー吸収装置がない場合に比べてすべての波周期で増大している。また短周期域では、スリットの効果によって、波エネルギー吸収装置がない場合よりも相対波高が抑えられていることが確認できる。

港湾の固定式防波堤や岸壁では、反射波によって周辺の船舶の航行や養殖施設等に対して影響を及ぼす可能性があるため、近年、種々の反射波低減対策が施されるようになってきている⁴⁾。メガフロートにおいても同様の懸念があり、このような観点からも本波エネルギー吸収装置が有効であることがわかる。

Fig. 14 Steady wave drift force.

Fig. 15 R.A.O. of relative wave height.

4. 実海域実証実験

4.1 波エネルギー吸収装置の概要

Fig. 16, 17 に実証実験で採用した波エネルギー吸収

装置を示す。実証実験浮体に設置された波エネルギー吸収装置は深さ 1.5m であり、4 つのユニットで構成されている。ユニットと浮体底面との溶接接合部の下に幅 0.25m のスリットを設けている。構造は単板構造として、適切な箇所に補強材を配置している。

4.2 推定値との比較

詳細 3 次元 PGM を用いて得られた実証実験浮体の上下変位周波数応答関数から、短期海象における上下加速度の有義値を推定した。

上下変位の応答関数は、波周期 3~9.75 秒 (0.25 秒間隔)、波向き 0~90° (22.5° 間隔) の条件下で求めた。波周期 3 秒以下は周期 0 秒で応答が 0 になるよう直線補間し、周期 10 秒以上は 0 とした。波スペクトルには設置海域の水深、風の吹走距離を考慮して JONSWAP スペクトル、方向分布関数には $\cos^4$ 型を採用した⁵⁾。

構造モデルに関しては、実機モデルを参考に、ロンジヤスティフナを考慮した等価なパネルでデッキ、ボトム、隔壁をモデル化して、全体として Table 1 に示した浮体諸元を満足するように設定した。Fig. 18 に構造モデルを示す。また Fig. 19 に示すように、バラスト重量、内部空間、上載建築物等による重量変化も考慮した。構造モデルの要素数は 14,494、節点数は 5,436 であった。

海底地形モデルを Fig. 20 に示す。なお、海底地形モデルは、総合模型実験対応計算で用いたものと同じであり、設置海域の通常波では本モデルを用いた計算結果が妥当であることを総合模型実験で確認している。

上下加速度の推定値と実測値の比較結果を Fig. 21 に示した。G3、G4 の位置は、それぞれ Fig. 9 に示している。推定値と実測値は良い一致を示しており、本推定法が実証実験浮体においても有効であることがわかる。

Fig. 17 Photograph of the wave energy absorbing device used for at-sea experiment.

Fig. 18 Computational model of Mega-Float.

Fig. 19 Distribution of weight.

Fig. 16 Schematic diagram of the wave energy absorbing device used for at-sea experiment.

Fig. 20 Computational model of the seabed.

Fig. 21 Comparison of the vertical acceleration between measurement and estimation.

5. 結 言

本研究では、メガフロートの弾性応答低減と波漂流力増大抑制の観点から有効な波エネルギー吸収装置の開発を行い、さらに波エネルギー吸収装置が付いたメガフロートの波浪中弾性応答を推定した。その結果、以下のような結論を得た。

- (1) 鋼製のカーテンウォール式消波機構に適切な幅のスリットを設けることにより、上下変位の低減効果を維持しつつ定常波漂流力の増大を抑制できることを実験的に確認した。
- (2) 詳細3次元弾性応答解析プログラムによって求めた上下変位周波数応答関数を用いて推定した上下加速度応答の有義値が実測値と良い一致を示し、本推定法が実証実験浮体においても有効であることが確認された。

謝 辞

本研究は、「メガフロート情報基地機能実証実験」において海上技術安全研究所が国土交通省より受託した研究開発の一部を取りまとめたものである。関係各位に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 尾崎雅彦, 大田真, 谷垣信吉, 珠久正憲, 井上俊司: 耐波型メガフロートの開発, 三菱重工技報, Vol. 37, No. 5, 2000
- 2) H. Ohta, T. Torii, N. Hayashi, E. Watanabe, T. Utsunomiya, K. Sekita, S. Sunahara: Effect of Attachment of a Horizontal / Vertical Plate on the Wave Response of a VLFS, Proceedings of International Workshop on Very Large Floating Structures (VLFS '99), Vol. 1, pp.265 ~274, 1999
- 3) 瀬戸秀幸, 越智真弓, 大田真, 河角省治: 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 (第四報), 日本造船学会論文集, 第189号, pp.45-54, 2001
- 4) (社)日本作業船協会, 大型浮防波堤による静穏海域創出技術の研究報告書, 1997
- 5) メガフロート技術研究組合, (財)沿岸開発技術研究センター: メガフロートの総合安全性評価手法に関する研究, pp.115, 2001