セミサブ型超大型浮体周囲の波浪減衰について (第3報)

正員 影 本 浩* 正員 藤 野 正 隆*
 正員 村 井 基 彦** 石 井 裕 司*
 学生員 斉 藤 雅 宣***

On the wave decay around a very large semisubmersible-type floating structure (3rd Report)

by Hiroshi Kagemoto, *Member* Masataka Fujino, *Member*
 Motohiko Murai, *Member* Yuji Ishii
 Masanori Saito, *Student member*

Summary

It has been shown in the last two reports that regular monochromatic waves propagating along a long array of cylinders fixed in the waves with equal distance are:

- (1) decayed monotonously along the array from the head of the array toward the end of the array when the wave frequency is relatively high.
- (2) enhanced as they propagate toward the end of the array when the wave frequency is relatively low.

It has also been shown that these two phenomena can be predicted fairly accurately by the linear potential theory. On the other hand, it was shown in the second report that there exists a certain intermediate frequency range where large surface elevations are predicted in the theoretical calculations whereas actual surface elevations do not become that large. It has been suspected that this discrepancy between the experimental results and the theoretical predictions, which are based on the linear potential theory, may be attributed to the wave breaking caused by excessive surface elevations. If this is the case, measured results should become closer to those predicted by the linear potential theory as the wave-height of the incident waves is decreased. In order to examine the propriety of this assumption, experiments are reconducted in the present study while varying the wave-height of the incident waves. Experiments in irregular waves are also conducted to examine the assumption from a different point of view. An attempt is also made to modify the linear potential theory so that the discrepancies between the measured data and the theoretical predictions can be accounted for.

1. 緒 言

同じタイトルのもとでの過去2編の論文¹⁾²⁾の中では、多数の脚で支持される型式の超大型浮体の支持脚群を想定して、等間隔に配置された脚群を透過する規則波の減衰特性を実験的・理論的に調査し、それらの定量的な減衰特性を利用することによって数万本といった非常に多数の脚で

支持される超大型浮体の波浪中弾性応答の計算量を軽減することのできる可能性を検討してきた。その過程で、1列に配置された多数の支持脚群に沿って規則的な波が進行する場合に、

- (1) 波の周期が比較的短い時には、脚間の水面変位は波上側から波下側に向かって一様に減衰する。
- (2) 波の周期が比較的長い時には、脚間の水面変位は波上側から波下側に向かって一様に増幅する。

ことがわかり、また、このような特性は線形ポテンシャル理論で予測される値と良く一致することがわかった。一方、Maniar and Newman³⁾によって指摘されたように、これら短周期帯、長周期帯の中間に一種の共振現象によって脚間の水面変位が非常に大きくなる周期帯が存在するこ

* 東京大学

** 横浜国立大学 (研究当時：東京大学)

*** 日立製作所 (研究当時：東京大学)

とが理論的に予測されるが、第2報において示したように実現現象では理論で予測されるよりもかなり小さな水面変位しか生じないという結果が実験事実として得られた。線形理論で予測される程に水面変位が増大したとすれば非現実的な波傾斜となり、実際には波崩れが生じると予想されるため、線形理論と実現現象との上記のような違いはこのような波崩れに起因するのではないかと考えられる。もしこのような推測が正しければ、水面変位の増大による波崩れが起きない程度に入射波の高さを小さくすれば、実験結果が線形理論値に近づくであろうとの予測の基に、本報(第3報)では第2報で行った実験と同じ実験を入射波波高を変えて行い、共振周期帯における線形理論値と実験結果との違いについて検討する。さらに、不規則波中においても同様な実験を行い、現象の線形性について別の角度から検討を行う。後に示すように、結果としては、入射波高を変えても脚間の水面変位振幅を入射波振幅で割った値はほとんど変化せず、波崩れなどによる非線形性によつては線形理論と実験との違いは説明できないことがわかる。このような結果を受けて、既存の線形理論の半実験的な修正の試みとして、流体運動に線形減衰力を付加的に考慮する修正理論によって理論計算値を実験結果に近づけることができることを示す。

2. 実験

2.1 供試模型

供試模型はFig. 1に示すようなフーティング付き円柱及び単純な円柱の2種類であり、単純円柱模型はフーティング付き円柱模型のフーティング部を取り除いたものである。フーティング付き円柱模型は第1, 2報で報告した水槽試験に用いた模型と同じものである。

1) A composite truncated (2) A truncated cylinder cylinder

Fig. 1 The models used for the experiments.

Fig. 2 An array of 50 legs in head waves.

2.2 実験方法

実験は東京大学船舶航海性能試験水槽(長さ50 m, 幅30 m)において行った。水深は2.18 mである。実験方法は第2報で示した方法と同様に、長さ18 mの鋼材をXY電車で固定し、チャンネル材及び単管を介して50本のフーティング付き円柱模型あるいは単純円柱模型をFig. 2に示すように等間隔に配置・固定した。中心間隔はフーティング付き円柱模型の場合にはコラム部の直径(165 mm)の2倍、単純円柱模型の場合には円柱直径(165 mm)の2倍で一定とした。従って、フーティング付き円柱模型に関する実験のセットアップは第2報で示したものと同一である。一方、単純円柱模型を用いた実験は今回新たに追加したものである。計測項目は模型間の計14点における水面変位であり、容量式波高計で計測した。実験に用いた波は規則波と不規則波である。波高は第2報ですべての周期についてほぼ20 mm一定として行ったが、今回は上述したように波高影響を調べるために波高10 mm, 20 mm, 30 mmの3種類に変化させて実験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 フーティング付き円柱群

まず50本のフーティング付き円柱模型を並べた実験において計測された水面変位変動の振幅分布をFig. 3(1)~Fig. 3(8)に示す。横軸の番号 n は波上から n 番目の円柱と $n+1$ 番目の円柱間の中央部の水面位置を示し、縦軸にはその水面位置における水面変位の変動振幅を入射波振幅で割った値を示している。実験結果としては入射波高10 mm($H_w=1.0$), 20 mm($H_w=2.0$), 30 mm($H_w=3.0$)の3種類の結果を示しているが、波高20 mmの結果は第2報に示したものを再プロットしたもので、波高10 mm, 30 mmの結果が今回新たに実施した実験により得られたものである。また、図中には比較のために円柱間の流体力学的相互干渉を厳密に考慮した線形ポテンシャル理論に基づく計算結果(Cal)を示している。図より、波高を3種類に変化させても入射波振幅(ζ_a)で無次元化した水面変位振幅の分布はほとんど変化せず、線形理論値が大きくなる共振周期帯(0.74~0.80秒程度)では、いずれの波高の実験結果も理論値よりかなり小さな値となっていることが特徴的である。即ち、現象は波高に関してはほぼ線形であるといえるにもかかわらず、線形理論に基づく計算結果と大きく異なる結果となっている。第2報ではこの計算結果と実験結果との違いは実現現象における波崩れなどの非線形影響によるものではないかと推測したが、本実験の結果から、現象は入射波高に関して線形な現象であることがわかったため、そのような可能性は小さいといえるであろう。

3.2 単純円柱群

次に50本の単純円柱模型を並べた実験において計測された水面変位変動の振幅分布をFig. 4(1)~Fig. 4(8)に

Fig. 3 The distributions of the surface elevation amplitude along an array of 50 composite truncated cylinders in head waves.

示す。入射波高 10 mm, 20 mm, 30 mm の 3 種類の結果共に今回新たに実施した実験により得られたものである。Fig. 3 に示したフーティング付き円柱群の場合と同様に、波高を 3 種類に変化させても入射波振幅 (ζ_a) で無次元化した水面変位振幅の分布はあまり変化せず、線形理論値が大きくなる共振周期帯 (0.69~0.75 秒程度) では、いずれの波高における実験結果も理論値よりかなり小さな値となる。即ち、線形理論と実験とのこのような違いは浮体の幾何学的形状によらず等間隔に配列された浮体群に普遍的に見られる性質であると推察される。

3.3 不規則波中の水面変位特性

現象の線形性を調べるため不規則波中の実験も行った。対象としたのは、Fig. 1 に示したフーティング付き円柱模型を、規則波中の実験と同様に中心間隔をコラム直径の 2 倍として 50 本 1 列に配置・固定した円柱群であり、

Fig. 4 The distributions of the surface elevation amplitude along an array of 50 truncated cylinders in head waves.

Fig. 5(1)に示すようなパワースペクトルを持つ不規則波を入射させた時の円柱間の水面変位の時系列から、各場所における水面変位のパワースペクトルを求めた。(Fig. 5(1)に示すパワースペクトルは計測された入射波時系列をスペクトル解析して得られたものである。) 代表的な場所における結果を線形計算結果と合わせて Fig. 5(2)~(4)に示す (たとえば 'Point 10' は波上から 10 番目の円柱と 11 番目の円柱の中間の水面位置を示す)。図中に示した計算結果は、当該場所における水面変位の RAO (周波数応答特性) の計算値と Fig. 5(1)に示した入射波のスペクトルを掛け合わせて求めたものである。図より配列の先頭部付近 (Point 1) では実験結果と計算結果とは良い一致を示している。一方、配列の波下側になるほど計算結果に比べて実験で得られるパワーが小さくなるのが顕著であり、特に共振周期帯 ($\omega=7.8\sim 8.5$ rad/sec 程度) ではその差が大きい。これらの結果は規則波中の周波数応答特

性に関して実験結果と計算結果との比較において見られた特性と共通するものであり、現象はやはり線形な現象であると言える。

4. 線形理論の半実験的修正

前章で示したように、水面変位が線形理論で非常に大きくなるが予測される共振周期帯では、実験によれば理

論で予測される水面変位よりかなり小さな水面変位となり、しかも入射波振幅で無次元化した水面変位振幅は入射波高によらずほぼ同じ値となるような線形性をもつことがわかった。実現においては流体運動に既存の線形理論では考慮されていない何らかの減衰力が働いているものと予測されるが、試みに、この減衰力を以下のように既存の線形理論に組み込むことによって理論計算結果がどのように変化するかを調べた。

現象が線形であることを考えて、流体粒子の運動方程式であるオイラーの運動方程式に以下のように線形減衰力 $N\vec{v}$ を付加する。

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad}) \vec{v} = \vec{K} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p - N\vec{v} \quad (1)$$

ここで、 $\vec{K}$ は単位質量あたりの外力ベクトルを表す。 $q \equiv |\vec{v}|$ と標記し、また $\vec{v}, \vec{K}$ などはそれぞれポテンシャル関数 Φ, Ω の勾配として表されると仮定すると、

$$\text{grad} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} q^2 + \frac{p}{\rho} + \Omega + N\Phi \right) = 0 \quad (2)$$

が得られる。上式を積分すると以下に示すような修正されたベルヌーイの式が得られる。

$$\frac{p}{\rho} = - \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2} q^2 - gz - N\Phi \quad (3)$$

ここで、外力としては重力だけを考慮し、 $\Omega = gz$ と書けるとした。周期運動状態を考えると $\Phi(x, y, z, t) = \phi(x, y, z)e^{-i\omega t}$ と書けるとすると、線形化された自由表面条件は以下のようになり、

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - \left(\frac{\omega^2}{g} + \frac{i\omega N}{g} \right) \phi = 0 \quad (4)$$

対応する分散関係式は

$$\frac{\omega}{g}(\omega + iN) = k \tanh kh \quad (5)$$

となる。ここで、 h は水深を表し、 k は波数を表す。波数は上に示した分散関係式より一般に複素数になり、その虚数部が波の減衰率を表すことになるが、既存の線形理論に基づく計算コードへは、波数の部分を複素数にするだけで

Fig. 5 The power spectra of surface elevations among an array of 50 composite truncated cylinders in irregular waves.

Fig. 6 The comparisons of the distributions of surface elevation amplitudes along an array of 50 truncated cylinders measured in the experiment and those predicted by the modified linear theory.

修正部を組み込むことができる。このような定式化に基づいて、50本の単純な円柱列の計算に適用した結果の例を実験結果と比較して Fig. 6(1)～(3)に示す。(Nの値は試行錯誤で実験結果に良く合う値を選んだ。) もともと実験結果と線形計算結果の一致度が良かった周期の短い場合 (Fig. 6(1)) では減衰力の付加によっても計算結果はあまり変化せず、依然として実験結果と比較的良好一致を示す。一方、線形理論値が実験結果に比べて非常に大きかった共振周期帯 (Fig. 6(2), (3)) では、減衰力の付加によって計算結果が大きく変化し、実験結果と良好一致を示すに至っている。

5. 考 察

第4章に示した修正理論では、場合によっては実験結果に良く一致する結果を得ることができた。付加的な減衰力によって共振時の応答だけが大きく低下するという特性は共振現象に共通に見られる現象ではあるが、今回の付加減衰力がどのような物理現象に対応しているのかは定かでなく、付加減衰力といった理論モデルの妥当性も含めて今後検討すべき課題の一つであろうと考えられる。一方、MITのNewman教授によって指摘されたように⁹⁾、仮に共振時に水面変位が非常に大きくなるとしても、波の入射

に伴って直ちに大きくなる訳ではなく、定常状態に達するにはある程度の時間がかかることが予想され、これまでの図に示した実験結果はまだ定常状態に達していない過渡状態における水面変位を計測している可能性もある。このような可能性を調べるために、実験施設の許容しうる範囲 (反射波の影響が顕著にならない範囲) で波を造波し続けて、円柱間の水面変位の時系列を計測した結果を Fig. 7(1), (2)に示す。横軸には計測開始時をゼロとした時の経過時間(秒)を示している。対象とした脚群は Fig. 1(2)に示した単純な円柱を50本配置したものである。Fig. 7(1)は周期0.69秒, Fig. 7(2)は周期0.70秒の規則波中における結果である。いずれの周期においても配列の先頭部付近では波の入射後短時間で定常状態に達しているが、配列の波下部では時系列にビート状の変調が見られ、特に周期0.69秒の場合にはこの傾向が顕著である。しかしながら、水面変位が時間と共に増大するといった過渡的な現象は観察されない。(Fig. 7(1)のPoint 50での時系列に見られる計測開始後100秒付近からの水面変位の増大は水槽の消波板からの反射波によるものであり、過渡現象を表しているものではない。) ちなみに、Fig. 4に示した結果は Fig. 7に示す横軸でおおよそ60秒から80秒の間の時系列をフーリエ解析して入射波と同じ周期成分の

(1) $T=0.69$ sec

(2) $T=0.70$ sec

Fig. 7 The time histories of the measured surface elevations among an array of 50 truncated cylinders in head waves.

振幅をとったものである。従って、この実験結果からは、造波を続けていけば水面変位が徐々に増大し線形理論値に近づくとは考えられないが、配列の波下部では現象が定常になりにくいことが観察される。理論的に可能な定常状態が実現で実現されるためには、その現象が安定であることが必要であるが、これらの実験結果は理論によって予測される共振状態が現象の不安定さのために実現されない可能性を示唆しているとも考えられる。このような可能性を検討するために、配列の間隔をランダムに5~10%程度変化させたり、50本の脚からランダムに選んだ脚を横方向(脚の配列の方向と直角方向)にわずかに移動させたりして計算を行ったが、依然として安定的に大きな水面変位が得られた。

結局のところ、(1)過渡状態、(2)不安定性などによっては共振周期帯における実現現象と線形計算結果との大きな差を説明しうるに至らなかった。

6. 結 論

超大型浮体の支持脚群を想定し、50本1列に配列したフーティング付き円柱群及び単純円柱群に規則波が入射する時、共振周期帯では線形理論計算で予測される円柱間の水面変位に比べて水槽試験で計測される水面変位はかなり小さいという前報の結果を受けて、入射波の振幅を3種類に変化させて同じ実験を行い、現象の非線形性について検討した結果、以下の結論が得られた。

(1)入射波の波高を変化させても入射波振幅で無次元化した水面変位はほとんど変化せず、対象としている現象は波高に関して線形な現象である。従って、前報で考察したような水面変位の増大による波崩れなどの非線形現象が線形理論と実験結果の差の原因である可能性は小さい。

(2)不規則波を用いた実験においても、水面変位のパワースペクトルに関する実験結果と線形重ね合わせの原理に基づいた計算結果との差異は規則波中の実験結果と線形理論値との差異と同様の傾向が見られ、このことから現象が線形であることが再確認された。

(3)流体運動に付加的な減衰力を取り入れた修正線形理論に基づいた計算結果で、上述の実験結果と線形理論値との違いがある程度説明はできたが、付加減衰力の物理的意味や減衰力の大きさの決め方などに曖昧さがある。

(4)円柱間の水面変位に関する実験結果と線形計算結果と

の差は、実験計測時に現象がまだ過渡状態であった可能性もあるが、少なくとも本実験の範囲内では、時系列の観察からはそのような可能性は低いことがわかった。ただし、共振周期帯では配列の波下側の水面変位の時系列はビート状の変調を示し、定常になりにくいことが観察された。

(5)上述したように、配列の波下側の円柱間では水面変位の時系列がビート状の変調を示し、なかなか定常にならなかったことから、実現現象におけるこのような不安定さが、実験結果と(定常状態を仮定した)線形理論値との差の原因とも考えられる。しかしながら、配列間隔を変化させた数値実験や円柱群中のいくつかの円柱の位置を横方向(配列の方向と直角方向)に少しずつさせた数値実験によっても、共振現象とみられる円柱間の大きな水面変位は依然として安定的に観察された。従って、実現現象の不安定さも実験結果と線形理論値の違いを説明しうるに至らなかった。

以上、等間隔一列に配列された脚群間の水面変位の実験結果と線形理論値との違いについて実験・理論両面から検討したが、結局のところ原因を十分に特定するには至らなかった。研究の主眼が若干細くなりすぎた感もあるが、本課題の解決なしには、脚を透過する波の減衰特性を定量的に把握し、多数の脚群によって支持される超大型浮体に働く流体力や波浪中弾性応答の計算負荷を軽減しようという本研究の本来の目的は達成できないと考える。

謝 辞

本研究で水槽試験に用いた円柱模型は運輸省船舶技術研究所海洋開発工学部よりお借りしました。

参 考 文 献

- 1) 藤野正隆, 影本浩, 石井裕司, 斉藤雅宣, 井奥寛: セミサブ型超大型浮体周囲の波浪減衰について, 日本造船学会論文集第182号(1997) 295-305.
- 2) 影本浩, 藤野正隆, 村井基彦, 石井裕司, 斉藤雅宣: セミサブ型超大型浮体周囲の波浪減衰について(第2報), 日本造船学会論文集第184号(1998) 275-286.
- 3) H. D. Maniar and J. N. Newman: Wave diffraction by a long array of cylinders, J. Fluid Mech., 339 (1997) 309-330.
- 4) Private communications with Professor J. N. Newman of MIT, 1998.