

浮揚式発電所の規則波による動揺特性

電力中央研究所水理部 正会員 池野正明

電力中央研究所水理部 正会員 平口博丸

電力中央研究所水理部 正会員 鹿島遼一

1. はじめに

我が国では現在、原子力発電所は岩盤上に建設されている。しかし、将来の立地候補地点を拡大するためには、それ以外の条件の場合でも建設可能な新立地方式の検討も必要である。浮揚式海上立地方式は、このような新立地方式の1つとして、図-1のように防波堤や護岸で囲まれた水域に発電プラント全体を浮かべるものである¹⁾。浮揚式発電所は、大型の浮体構造物で吃水に比べて浅い水深を対象とし、防波堤や護岸からの反射波の影響が強いほぼ閉じた水域に長期係留される点に特徴がある。浮揚式海上立地方式の場合、波浪は防波堤の遮断効果によって低減されるが、海水交換機能を持たせるために設けられた開口部からの波の侵入によりプラントバージがある程度動揺することが予想される。さらに、水域内に侵入してきた波はバージ壁面や護岸で多重反射し増幅する可能性もある。特にバージの回転動揺が大きくなるとプラント搭載物の機能に支障を来す恐れがあるため、閉鎖水域でのプラントバージの波浪による動揺量を適切に評価する必要がある。浮体の動揺解析には、従来から、ポテンシャル理論に基づき、浮防波堤や接岸船体を対象にして様々な解析手法が提案されている^{2)~6)}。本研究では、浮体の動揺解析に有効とされているポテンシャル接続法(領域分割法)と境界要素法の2つの手法に基づき、護岸による多重反射の影響を考慮して、線形係留された大型浮体の規則波による2次元動揺解析を行い、実機の1/100縮尺模型実験結果との比較で、ポテンシャル理論に基づく上記の解析手法の精度を動揺の位相差や波浪諸元も含めて検証し、プラントバージの動揺評価に適用する際の問題点を検討した。

2. 解析手法の概要

図-2に解析に用いた2次元座標系を示す。基礎式と境界条件は従来と同様で流体運動を非粘性・非圧縮の2次元運動と仮定した微小振幅波のポテンシャル理論に基づいており、解析手法はポテンシャル接続法(領域分割法)と境界要素法の2種類である。ただし、護岸では任意反射率を有する護岸の境界条件として次式を用いている¹⁾。

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x=-R} = \frac{1.0 - r e^{i\epsilon}}{1.0 + r e^{i\epsilon}} \cdot i k \phi \Big|_{x=-R} \quad (1)$$

式(1)中、Rは浮体の中心軸と護岸との距離、 r と ϵ は護岸による任意の反射率と位相差、 k は波数、 i は虚数単位、 ϕ は時間項を省略した速度ポテンシャルである。

3. 実験方法および実験条件

入射波と浮体の動揺量の関係を位相差も含めて詳細に調べるため実機プラント(110万kw級寸法14.2m×14.2m×3.5m)の1/100縮尺模型実験を行った。実験は、2次元水路(幅0.9m、深さ1.2m、長さ76.5m)を用いて行った。浮体模型は14.2cm×8.9cm×3.5cmの亚克力製で内部はます目状に仕切られている。このます目に重りを配置することにより、浮体の荷重配置が自由にえられるように工夫されている。実験では、浮体の重量および重心の位置は一定にしてROLLの慣性モーメントのみを3種類変えるようにした。係留方式はドルフィン等を想定した水平係留とし、浮体の岸側の面においてのみ行い、断面方向に線形バネを2基配置した。模型浮体の諸元を表-1に、概略図を図-3に示す。浮体の動揺量の計測にはレーザ変位計¹⁾を用い、浮体の3点の変位量を同時計測し座標変換することにより、重心位置での回転、水平、鉛直動揺量および位相差を求めた。

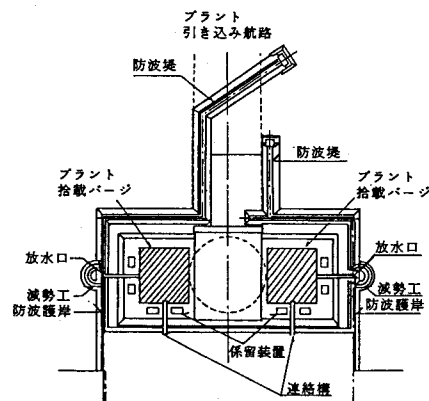


図-1 海上立地浮揚式発電所概要図

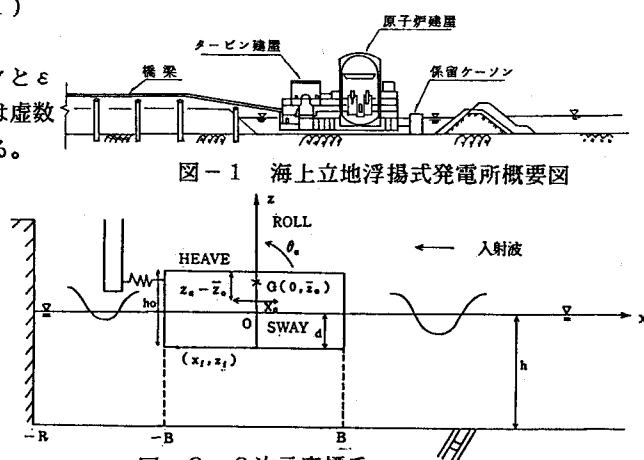


図-2 2次元座標系

浮体の沖側および岸側には各々3台の容量式波高計を設置し、入射波・反射波・透過波を求めた。実験に用いた規則波は、波高約2 cmと一定にし周期のみを0.8秒から3.0秒まで0.1~0.05秒ごとに33種類変化させた。なお、用いた水深は24 cmと60 cmの2種類である。水深60 cmの実験は、対象としている水深が浮体の大きさに比べて浅いために生じる浮体の造波抵抗力や動揺特性の違いを調べるために行ったものである。また、重複波を対象とした実験では、浮体背後に直立の完全反射壁を設置し、浮体と反射壁の距離を150 cmから200 cmまで10 cmごとに6種類変化させた。

表-1 模型浮体の諸元

模 型		実 規 模 換 算
浮 体 幅 2B	142.0 cm	142.0 m
興 行 幅 l'	89.0 cm	142.0 m
高 さ h_0	35.0 cm	35.0 m
重 量 w	195.7 kgf (2.199 kgf/cm)	3.123×10^5 tf
吃 水 d	15.5 cm	15.5 m
重 心 高 さ z_0	(静水面上) 6.5 cm	6.5 m
ROLLの慣性モーメント I	一様分布	$36.85 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ($0.4140 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{cm}$)
	中央集中	$24.24 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ($0.2724 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{cm}$)
	両端分散	$52.53 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ($0.5902 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{cm}$)
係留装置のパネ定数 K		3.0 kgf/cm ($6.7 \times 10^{-2} \text{ kgf/cm}^2$)
		1.3 kgf/cm ($2.9 \times 10^{-2} \text{ kgf/cm}^2$)
		48 tf/cm
		21 tf/cm

()は単位換行当。

4. 実験結果と計算結果の比較検討
 4. 1 防波護岸がない場合に対する検討
 (1) 浮体の動揺量

図-4 (a)~(c)は3種類の荷重条件のうち一様分布荷重浮体の水平、鉛直、回転運動の周波数応答特性を示したものである。図-4中の横軸は浮体幅2Bと入射波長Lの比および入射波の周期T、図(a)の縦軸は重心の水平運動の両振幅を入射波高 H_1 で無次元化した値、図(b)の縦軸は重心の鉛直運動の両振幅を入射波高 H_1 で無次元化した値、図(c)の縦軸は重心の回転運動の両振幅(rad単位)に、浮体の半幅 $B (= 71 \text{ cm})$ を乗じて入射波高 H_1 で無次元化した値である。図中、黒丸印が実験値、実線がポテンシャル接続法による解析解、点線がポテンシャル接続法において、減衰定常波成分を省略して解いた近似解、一点鎖線が境界要素法による数値解である。図-4 (a)~(c)によれば、実線の解析解と一点鎖線の数値解はお互いによく一致しているが、浮体周辺に生じる減衰定常波成分の影響を無視して求めた近似解は他の計算結果と若干差異が生じている。図(a)と(c)によると、水平運動SWAYと回転運動ROLLの3つの計算結果は水平運動と回転運動の共振周期付近以外では実験結果とよく一致しているが、共振周期付近では計算値が実験値を上回り、過大評価となっている。これは、解析手法が、完全流体場におけるポテンシャル理論に基づいているため、浮体運動や流体運動に伴う粘性抵抗力が考慮されておらず、共振周期付近で動揺が大きくなると、粘性抵抗力の効果が無視できなくなるためと考えられる。一方、図(b)によると、鉛直運動HEAVEの実験値と計算値はよく一致し、鉛直運動に対する粘性抵抗力の影響は無視できるほど小さいと考えられる。つぎに、図(a)~(c)において、水深 $h = 24 \text{ cm}$ と $h = 60 \text{ cm}$ の動揺特性を比較する。水深が浅くなると、浮体の付加質量と付加慣性モーメントが増加し、HEAVEとROLLの共振周期が長くなる。また、回転運動において、水深が浅くなると実験結果と計算結果でROLLの共振周期に若干のずれが生じている。この原因として付加慣性モーメントの理論値が、浮体の大きさに比べて水深が浅くなることにより、実際の値と異なってくるためと考えられる。

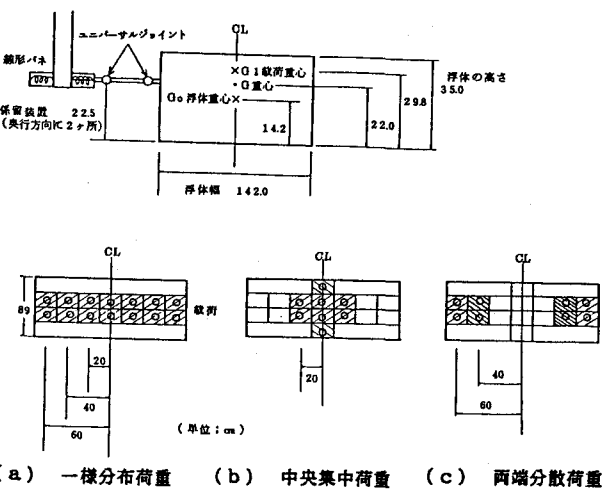


図-3 模型浮体

(2) 浮体による反射率・透過率

図-4 (d)、(e)は浮体による反射率、透過率を表す。図には、実験値、ポテンシャル接続法による解析解と近似解および境界要素法による数値解が示されている。図(d)、(e)によると、浮体の運動の共振周期付近で実験値は計算値ほど顕著に応答しないが、それ以外の周期では両者はよく一致しており、浮体の運動と反射率、透過率には密接な関係があることがわかる。計算値には、エネルギー損失はなく、反射波と透過波のエネルギーの合計が入射波のエネルギーと等しくなっているが、実験値においては流体運動と浮体運動に伴う粘性抵抗力に起因するエネルギー損失が生じ、共振周期付近で波高として4割、それ以外の周期で波高として1割程度のエネルギー損失率となっている。

(3) 浮体運動の位相差

図-4 (f)、(g)に水平運動、鉛直運動の回転運動に対する位相差の周波数応答特性を示す。図には、実験値、

ポテンシャル接続法による解析解と近似解および境界要素法による数値解が示されている。図 (f)、(g) によると、浮体の運動の共振周期付近で実験値は計算値ほど顕著に応答しないが、それ以外の周期では両者はよく一致している。また、浮体の運動は入射波の種類によって振幅だけでなく位相も異なる。

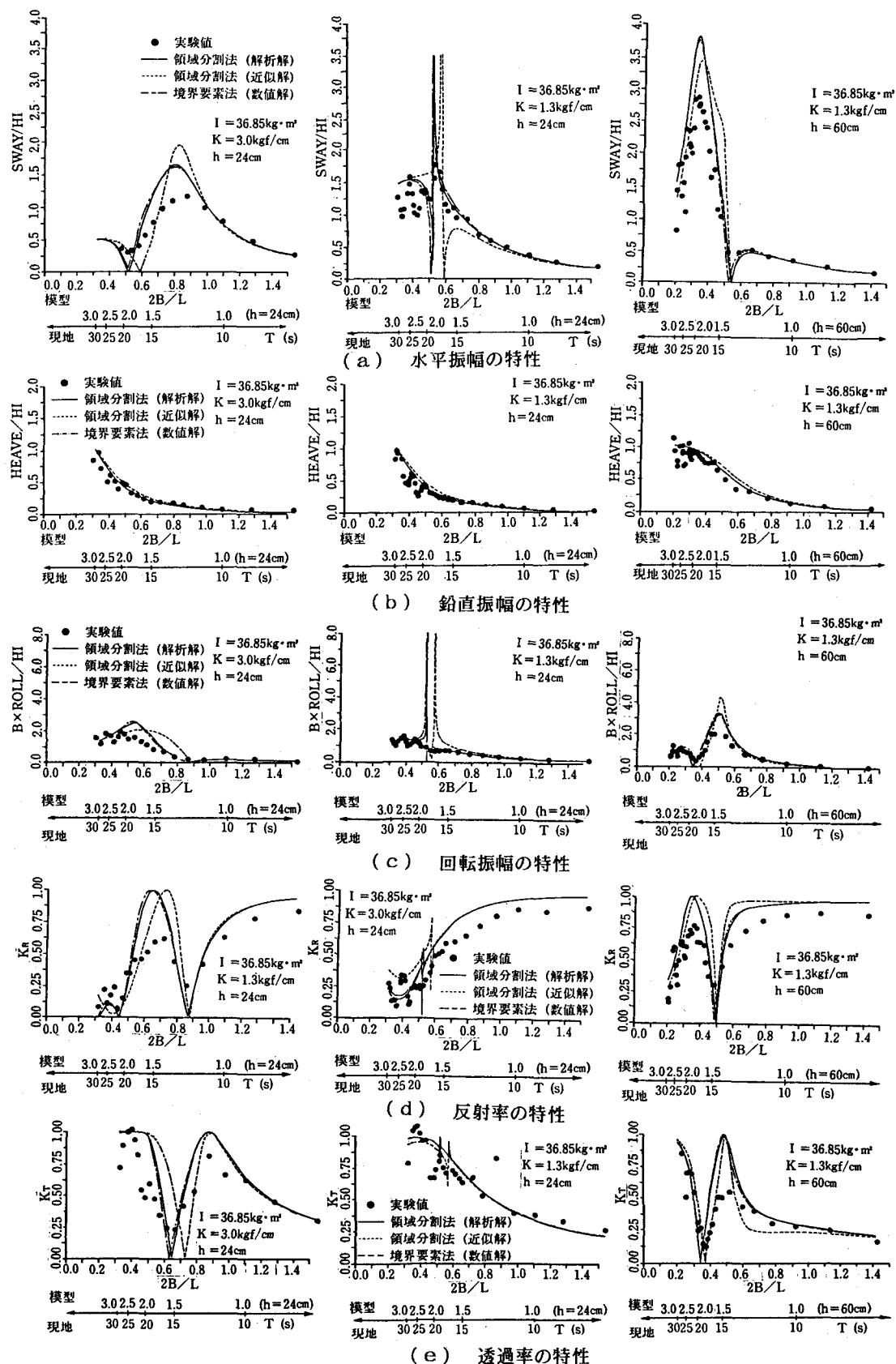
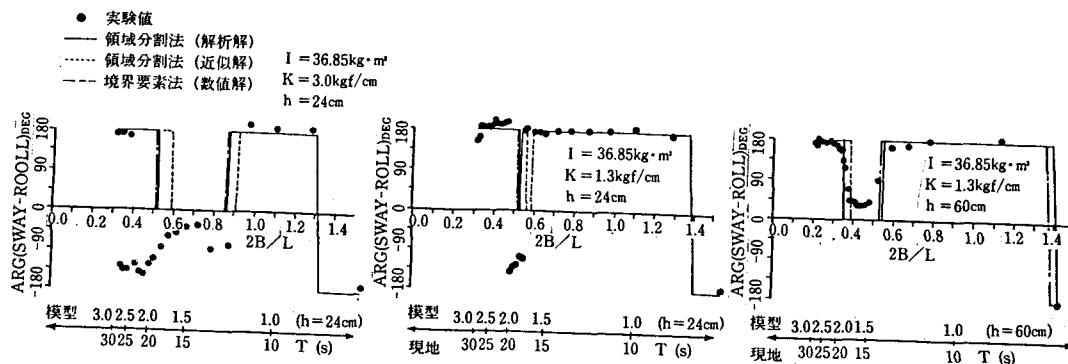
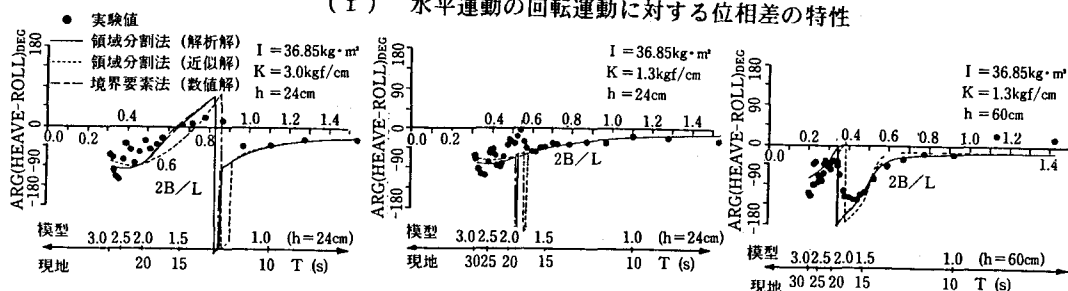


図-4 護岸からの反射波がない場合の動揺特性



(f) 水平運動の回転運動に対する位相差の特性



(g) 鉛直運動の回転運動に対する位相差の特性

図-4 護岸からの反射波がない場合の動揺特性

4.2 防波護岸からの反射波がある場合に対する検討

(1) 浮体の動揺量

図-5に護岸と浮体の背面壁の距離 ΔS が150cmとなるように設置した場合の周波数応答特性を示す。図-5(a)~(c)は浮体の水平運動SWAY、鉛直運動HEAVE、回転運動ROLLの周波数応答特性である。図中、黒丸印は実験値、3種類の曲線は境界要素法による計算値である。実験で用いた反射壁は表面がなめらかな鋼製直立板であるので、計算に用いる護岸の反射率 γ を1.0、位相差 ε を0.0にすればよいが、参考のために $\gamma=1.0$ (実線)の他に $\gamma=0.8$ (一点鎖線)、 $\gamma=0.5$ (点線)も示してある。図(a)~(c)によると、浮体運動の共振周期に加えて、反射壁と浮体間の距離によって決まる重複波の共振周期が存在するために進行波の場合よりも複雑な応答特性を示す。特に、ある特定の入波波の周期では、進行波の場合よりも動揺量が、かえって低減する場合がある。計算には粘性抵抗力が考慮されていないので共振周期で過大応答となっている。

(2) 浮体による反射率

図-5(d)は浮体による反射率の周波数特性を示したものである。ここで言う反射率とは、浮体から沖側へ向かう進行波のことで、浮体によって直接反射された成分と浮体の下をいったん通過して背後の反射壁で反射され、沖方向へ浮体の下を再通過した成分が合成されている。図(d)によると、浮体による反射率は反射壁で完全反射する場合は、理論上、入射波の周波数に関係なく1.0となる。しかし、実験値は流体運動や浮体運動に伴う粘性抵抗力の効果によりエネルギー損失が生じるため1.0よりも小さくなり、周波数特性の違いが認められる。

(3) 浮体と護岸の距離と浮体運動

次に、護岸と浮体の距離を変化させた場合の浮体の動揺特性を検討する。図-6(a)、(b)、(c)は入射波の周期を一定にして、反射壁と浮体の距離を変えていった場合のSWAY、HEAVE、ROLLに関する応答特性の代表例である。図中、横軸は浮体の中心軸と反射壁との距離 R と入射波長 L との比を示している。黒丸印が実験値、3つの曲線は境界要素法による計算値である。図-6によると、護岸と浮体の距離 R を変えることにより、浮体の位置が重複波の腹から節へと移動し、動揺量も変化する。図(a)~(c)によると、SWAYとROLLが最大となる R/L の値はほぼ一致し、逆にHEAVEは最小となる。すなわち、 R を変化させていくと水平運動と鉛直運動が卓越する応答が交互に現れる。

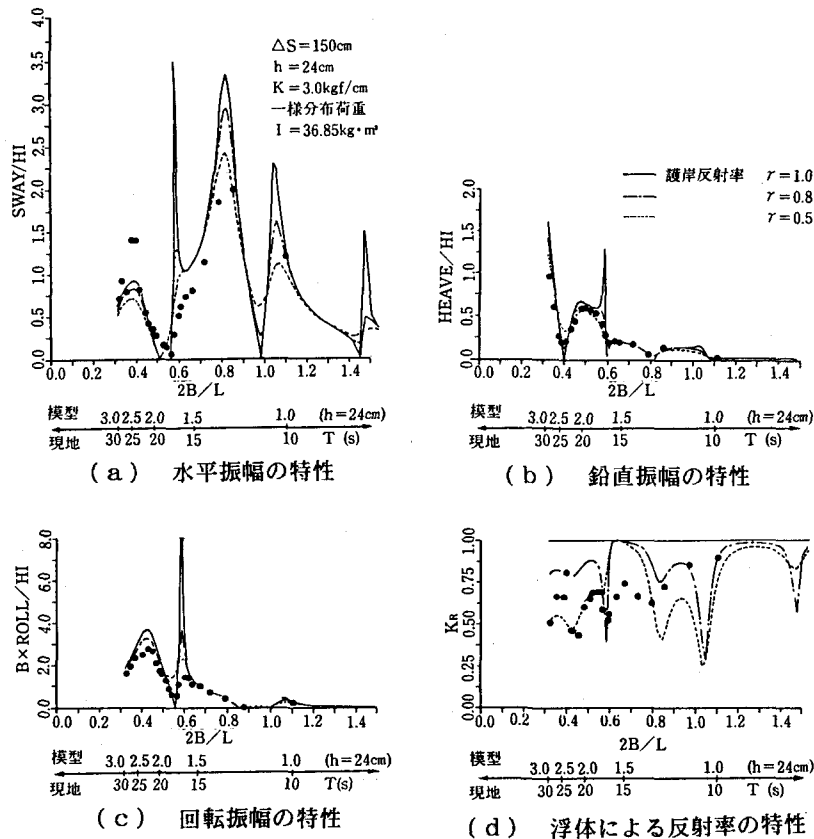


図-5 護岸からの反射波がある場合の動揺特性

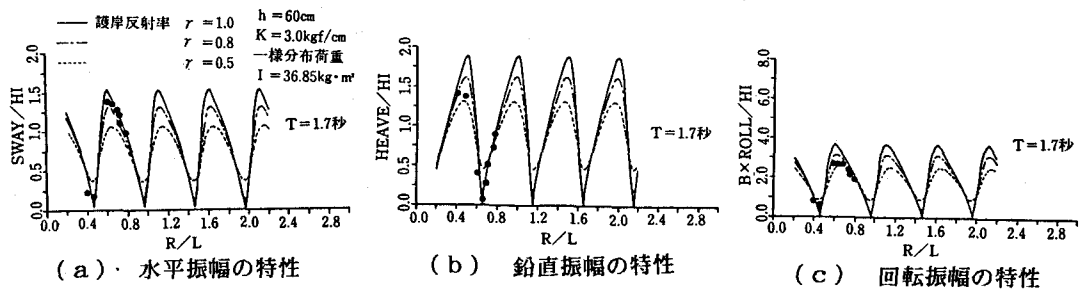


図-6 浮体と護岸との距離の影響

5. 解析モデルの修正

5.1 修正方法

浮体の動揺量の理論値は運動の共振周期付近で実際の現象よりも過大応答となる。また、水深が浅くなると、回転運動において、共振周期自体にずれが生じる。これらの問題点を検討するために解析モデルの修正を試みた。流体運動や浮体運動に伴う粘性抵抗力は、水平運動と回転運動において、浮体の動揺量が増大する共振周期付近で顕著になった。エネルギー損失率から推察すると流体と浮体の相対速度の2乗に比例する形の抵抗力が働くと考えるのが妥当であろう。すなわち、モリソン式中の抗力成分に相当するものである。しかし、流体運動の特性をうまく表現できる流速の代表値を選ぶことは困難である。そこで、流体と浮体の相対速度の2乗に比例する抗力を浮体の運動速度の2乗に比例する抗力とみなせると仮定する。さらに、この非線形な抗力を浮体の運動速度に比例する形で近似することにし、SWAYとROLLの運動方程式に加えた。この修正方法は小舟⁸⁾による方法と一致するものである。ここでは、取り扱いが簡単で浮体運動の関連因子の影響も把握しやすいポテンシャル接続法の近似解を取り挙げる。また、ROLLの共振周期の実験値と計算値のずれを補正するために付加慣性モーメントの理論値を実験値に合うように修正した。

5.2 修正方法の適用性

図-7～図-8に本修正方法を用いた計算結果の代表例を示す。図-7は浮体背後に護岸がない場合の周波数応答特性である。図中、黒丸印が実験値、点線がポテンシャル接続法による近似解の修正前の計算値、一点鎖線が上記の抗力のみを考慮した場合の計算値、実線が抗力と付加慣性モーメントの修正を考慮した場合の計算値である。なお、HEAVEの応答特性は修正前の計算結果と修正後の計算結果とでほとんど差異は認められなかったため、図には示

していない。図-7によると、浮体の運動速度に比例した近似的な抗力の導入と付加慣性モーメントの理論値を修正することによって浮体運動の振幅や位相を共振周期付近においても実際の現象と一致させることが可能となる。しかし、本修正方法で考慮した粘性抵抗力は浮体の運動速度に比例した形となっており、流速の寄与分が無視されている。このため浮体による反射率、透過率は本修正方法でも一致しない周波数領域が存在する。図-8は反射率 $\gamma = 1.0$ を有する護岸と浮体の背面壁の距離 ΔS が150cmとなるように設置した場合の周波数応答特性である。図中、黒丸印が実験値、実線が同様の修正方法での計算値である。図-8によると、重複波についても本修正方法で浮体の動揺量を実際の現象と一致させることが可能である。浮体による反射率の計算値は護岸反射率 $\gamma = 1.0$ の場合でも、図-5と異なり、浮体運動に伴う粘性減衰によってエネルギー損失が生じるため、浮体による反射率は1.0よりも小さくなっている。しかし、実験値の周波数特性とは若干異なるようである。

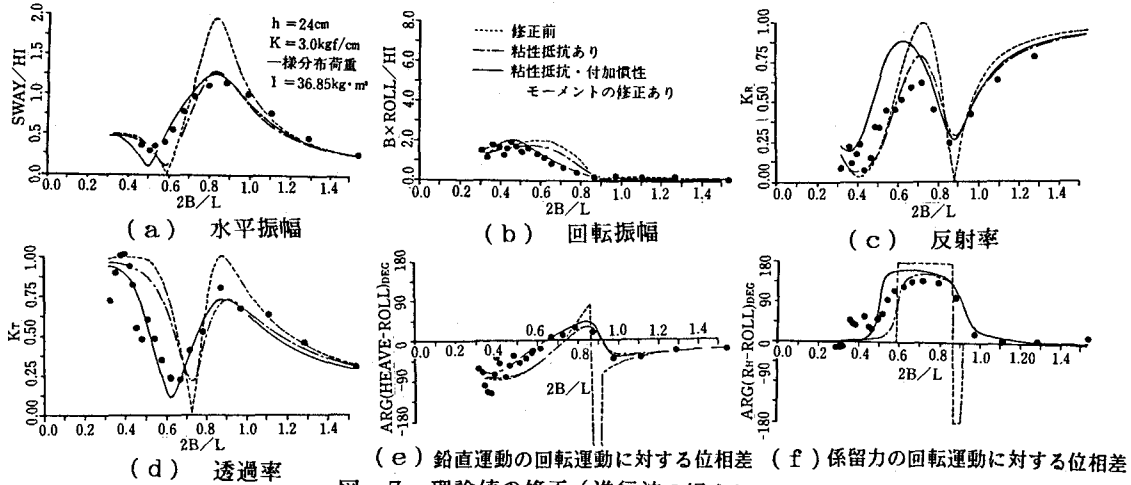


図-7 理論値の修正（進行波の場合）

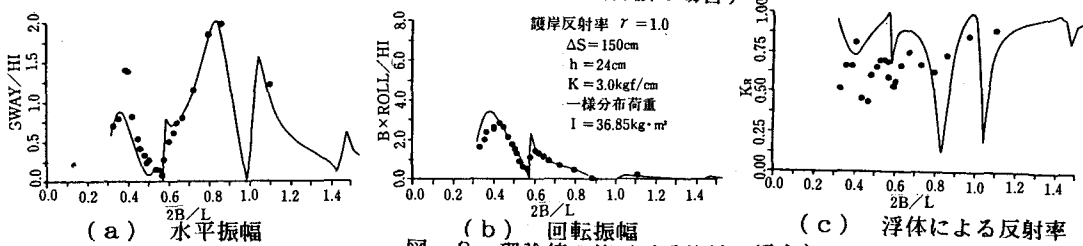


図-8 理論値の修正（重複波の場合）

6. まとめ

- ① ポテンシャル理論に基づく上記の解析手法は浮体運動の共振周期付近以外では実際の現象とよく一致し、妥当な解が得られる。
- ② 上記の解析手法は浮体運動の共振周期付近で実際の現象より過大応答となる。また、浮体の大きさに比べて水深が浅くなると、回転運動において共振周期の理論値と実際の値とでずれが生じる。
- ③ 浮体の動揺量は上記の解析手法に浮体の運動速度に比例した形の近似的な抗力の導入と付加慣性モーメントの理論値を修正することによって実際の現象と一致させることが可能であるが、この修正方法では流速の寄与分が無視されているため、浮体による反射波・透過波については一致しない周波数領域が存在する。
- ④ ブラントバージの動揺量は浮体運動の共振周期で最大となる。
- ⑤ 護岸により多重反射系が形成されると、バージ壁面と護岸の距離と入射波の波長の関係によって決まる共振周期でも動揺量が増大し、護岸から波が完全反射する場合には完全消波する場合の1.5～2.0倍の動揺量となる。
- ⑥ ドルフィンなどの水平係留方式の場合、SWAYの特性はバネ定数に支配される。しかし、HEAVE、ROLLの特性はブラントの寸法や重量で決まり、バネの強さを変えても、大きな特性の変化は生じない。

参考文献

- 1) 池野正明、平口博丸：浮揚式発電所の規則波による動揺特性、電力中央研究所報告、研究報告、U88042、59p.、1988。
- 2) 井島武士、田淵幹修、湯村やす：有限水深の波による矩形断面物体の運動と波の変形、土木学会論文報告集、第202号、pp. 33～48、1972
- 3) 伊藤善行、千葉繁：浮防波堤の水理に関する近似理論と応用、港湾技術研究所報告、第11巻、第2号、pp. 137～165、1972
- 4) 榎木享、久保雅義、京谷光高：荷役限界からみた港内静穏度に関する研究（第2報）、第25回海岸工学講演会論文集、pp. 593～597、1978
- 5) 上田茂、白石悟：係留船舶の動揺計算法とその評価、港湾技術研究所報告、第22巻、第4号、pp. 181～218、1983
- 6) 清川哲志、平山彰彦、高梨和光、小林浩：ハイブリット型境界要素法による任意反射率防波堤前面の船体動揺解析、第30回海岸工学講演会論文集、pp. 450～454、1983
- 7) 合田良実：港湾構造物の耐波設計、鹿島出版会、240p.、1981
- 8) 小舟浩治：浮体係留における粘性抵抗力および拘束条件の影響について、港湾技術研究所報告、第17巻、第4号、pp. 59～87、1978